



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

**Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa**

Estudi del disseny d'una PCB per la lectura de dades d'un resolver

Memòria

Titulació: Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica

Estudiant: Manel Vilella Vega

Director: Dr. Jordi Zaragoza Bertomeu

Data d'entrega: 10/06/2019

Convocatòria: Q2 2018-2019

Agraïments

En primer lloc agrair als meus pares i tota la meva família que m'han impulsat a emprendre els meus estudis universitaris i m'han recolzat amb totes les seves forces.

Als meus amics Kevin, Gerard i Ferran amb qui he pogut comptar durant tot el treball i que, juntament a tots els altres companys i companyes m'han fet passar els quatre millors anys de la meva vida.

Al Jordi Zaragoza, al Nestor Berbel i al Manel Lamich que m'han donat un suport tècnic amb una predisposició incondicional.

Finalment a tots aquells professors, tant els que hi són com els que ja no, que amb la seva dedicació m'han fet tenir passió pel que faig i m'han aportat coneixements i valors inestimables.

Sumari de continguts

Sumari de continguts.....	3
Sumari de figures	5
Sumari de taules	7
1. Introducció	8
1.1. Objecte del projecte	8
1.2. Justificació del projecte	8
1.3. Abast del projecte	9
1.4. Especificacions bàsiques	9
2. State of the art	10
2.1. FOC.....	10
2.2. Resolver	12
2.3. Comunicació digital	14
2.3.1. Comunicació paral·lela	14
2.3.2. SPI.....	14
2.3.3. I2C	16
2.3.4. CAN Bus.....	17
3. Disseny PCB.....	19
3.1. Característiques del TS2640N441E26	19
3.2. Esquema general	20
3.3. Comunicacions.....	20
3.4. Filtratge	21
3.5. Tria de components.....	26
3.5.1 ADC	26
3.5.2 Microcontrolador	27
3.5.3. Filtres.....	29

3.5.4.	Alimentació	29
3.5.5	Connectors	30
3.6.	Schematics.....	31
3.6.1.	Microcontrolador	31
3.6.2.	ADC	32
3.6.3.	Filtres	33
3.6.4.	Alimentació	33
3.6.5.	Connectors	33
3.7.	PCB.....	34
4.	Programació	40
4.1.	Configuració ADC.....	40
4.2.	Esquema general de funcionament.....	44
4.3.	Inicialització del codi.....	44
4.4.	Funcions del codi	49
4.4.1.	void SystemClock_Config(void);	49
4.4.2.	void Config91(void);	50
4.4.3.	void Config92(void);	50
4.4.4.	static void MX_GPIO_Init(void);	51
4.4.5.	static void MX_CAN_Init(void);	51
4.4.6.	void PinConfigWR(char WR);	51
4.4.7.	int PosicioADC(void);	51
4.4.8.	int velocitatADC(void);	52
4.4.9.	void CAN_send(char ID, char Data).....	52
5.	Test.....	53
6.	Pressupost.....	63
7.	Conclusions	66
8.	Bibliografia	67

Sumari de figures

Figura 1	Esquema de blocs control FOC [11]	11
Figura 2	Esquema de la disposició de les bobines d'un resolver [9]	12
Figura 3	Representació de la senyal d'excitació (negre), sinus induït (blau) i cosinus induït (vermell) d'un resolver [6]	13
Figura 4	Representació del Clock i Data de la comunicació SPI [1]	15
Figura 5	Connexió entre dos dispositius SPI	15
Figura 6	Connexió entre dispositius I2C [2]	17
Figura 7	Esquema general.....	20
Figura 8	Esquema filtre diferencial pels sinus i cosinus d'entrada [14]	21
Figura 9	Filtre diferencial	22
Figura 10	Esquema filtre butterworth 3r ordre	24
Figura 11	Esquema amplificador no inversor.....	25
Figura 12	PCB amb els components situats	34
Figura 13	PCB amb la xarxa de GND amagada	35
Figura 14	PCB rotejada	36
Figura 15	PCB amb pla de massa superior	37
Figura 16	PCB amb pla de massa inferior	37
Figura 17	PCB amb serigrafies (mostrades en groc).....	38
Figura 18	Representació en 3D superior de la PCB	38
Figura 19	Representació en 3D inferior de la PCB	39
Figura 20	Representació dels pins utilitzats i temps necessaris per la comunicació paral·lela amb el ADC	41
Figura 21	Temps necessaris per la comunicació paral·lela amb el ADC	41
Figura 22	Esquema general de funcionament del codi del microcontrolador	44
Figura 23	Captura de pantalla del programa CubeMX	47
Figura 24	Pinout del microcontrolador mostrat pel programa CubeMX	48
Figura 25	Imatge de la bancada del motor MA-55 que conté el TS2640N441E26.....	53
Figura 26	Connexions afegides del microcontrolador a GND	54
Figura 27	Sinus generat pel ADC a 10kHz	54
Figura 28	Fase de filtrat amb el problema de schematics solucionat	55

Figura 29	Vista general de la PCB.....	55
Figura 30	Senyal d'excitació diferencial no filtrada	56
Figura 31	Senyal d'excitació respecte GND no filtrada.....	57
Figura 32	Senyal d'excitació diferencial filtrada	57
Figura 33	Senyal d'excitació respecte GND filtrada.....	58
Figura 34	Senyal d'excitació diferencial filtrada i amplificada	58
Figura 35	Senyal d'excitació respecte GND filtrada i amplificada.....	59
Figura 36	Senyal d'excitació connectada al resolver	59
Figura 37	Representació de Sin vs Cos	60
Figura 38	Representació de Sin vs Cos	60
Figura 39	Representació de Sin vs Cos	61
Figura 40	Connexionat de test de lectura	61
Figura 41	Variables del programa en temps real	62
Figura 42	Representació dels costos del projecte	63

Sumari de taules

Taula 1	Possibles microcontroladors a utilitzar	27
Taula 2	Informació taula multi criteri	28
Taula 3	Taula multi criteri.....	28
Taula 4	Op-amps utilitzats en el projecte.....	29
Taula 5	DCDC i reguladors de voltatge utilitzats en el projecte	30
Taula 6	Bits del registre de control.....	43
Taula 7	Pinout del microcontrolador, ADC i altres connexions	46
Taula 8	Costos del projecte	63
Taula 9	Distribució de les hores de treball i dependències	64

1. Introducció

1.1. Objecte del projecte

L'objectiu d'aquest projecte és detallar el procés de lectura i calibració d'un resolver (TS2640N441E26 del fabricant Tamagawa) per a un motor síncron d'imants permanents (PMSM), mitjançant el disseny d'una PCB i la comunicació amb una dSpace DS1103 encarregada del control del inverter del motor.

1.2. Justificació del projecte

Aquest projecte es fa com a complementació de dos treballs de final de màster realitzats pel Josep Biscamps Dalmau, *Projecte d'un ondulator trifàsic d'altres prestacions per a un vehicle elèctric de Formula Student* i *Projecte de control d'un ondulator trifàsic amb transistors SiC*.

En aquests treballs es planteja un ondulator trifàsic controlat amb FOC (Field Oriented Control), per aquest tipus de control es necessita el angle del motor. Aquest es pot obtenir amb una tècnica sensorless que fa ús d'observers per estalviar-se la necessitat de sensors sense una gran pèrdua de rendiment o precisió, per altra banda el mètode més utilitzat encara és l'ús de sensors.

S'utilitzen principalment dos tipus de sensors, els encoders i els resolvers. En aquest projecte s'utilitza un resolver TS2640N441E26 que és el que va muntat en el motor del que es disposa en el laboratori. D'aquí neix la justificació d'aquest projecte, amb la necessitat d'una electrònica que utilitzi aquest sensor i que en transmeti la informació.

La motivació personal en realitzar aquest projecte ve del meu interès en els vehicles elèctrics i les noves tecnologies implementades en aquest nou concepte de mobilitat, i aquest interès ve reforçat de la meua etapa al projecte de Formula Student de l'ESEIAAT, a l'equip UPC ecoRacing.

La Formula Student és una competició d'enginyeria a nivell universitari on les universitats d'arreu del món competeixen en el marc de projectes d'enginyeria enfocats en el desenvolupament d'un monoplaça de competició. En aquesta competició es valora tant l'enginyeria que hi ha darrera del projecte com les

prestacions del vehicle en pista, en proves dissenyades per avaluar el rendiment de les diferents parts del monoplaça.

Per altra banda es un projecte complet ja que es tracten molts aspectes assolits durant el grau en enginyeria electrònica industrial i automàtica com són el disseny hardware de electrònica, es a dir del disseny de PCBs, la programació de microprocessadors, el disseny de filtres passius i actius, els mètodes de control de maquines elèctriques i la elaboració de pressupostos, entre molts altres àmbits implícits dins de els ja anomenats.

1.3. Abast del projecte

Durant la realització del projecte es duran a terme les següents tasques:

- Estudi dels filtres
- Disseny de la PCB
- Fabricació de la PCB
- Test del disseny

No s'inclou dins l'abast del projecte:

- Estudi dels efectes de les EMI
- Disseny per la producció

1.4. Especificacions bàsiques

La PCB dissenyada ha de funcionar amb el resolver inclòs en el motor MA-55 i s'ha de comunicar amb la dSpace DS1103.

- Connector D9 pel resolver
- Comunicació I2C, Analògica, UART o CAN amb la dSpace
- Generació de l'excitació del resolver
- Filtratge de les senyals
- Control sobre els possibles errors

2. State of the art

2.1. FOC

Les PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) són màquines elèctriques de corrent altern en les quals el camp d'excitació el generen imants permanents i que tenen una força contraelectromotriu sinusoidal.

Tenen les següents característiques entre moltes altres:

- Poden generar parell a velocitat nul·la
- Tenen una major densitat de parell amb respecte altres motors
- Tenen un alt rendiment
- Necessiten un inverter controlat digitalment

Per tant es pot veure que el major problema és que necessiten un seguit de circuits electrònics complexos tot i que per les necessitats actuals la majoria de sistemes necessiten un control electrònic de la velocitat, el parell o altres variables, per tant aquesta necessitat d'una electrònica avançada ve donada pels dos costats.

Els algorismes de control de màquines PMSM es poden dividir en dos grans grups. El primer grup s'anomena control escalar i el segon control vectorial.

Un dels controls vectorials més utilitzats és el FOC o Field Oriented Control.

La tècnica FOC aporta millores en el rendiment com una eficiència major, un control total del parell (de 0 al nominal) i una dinàmica millorada.

Pel control FOC es necessari tenir un model precís de la màquina elèctrica ja que d'això dependrà el seu funcionament, per tant, s'han de fer estudis previs sobre la PMSM abans de aplicar el control FOC.

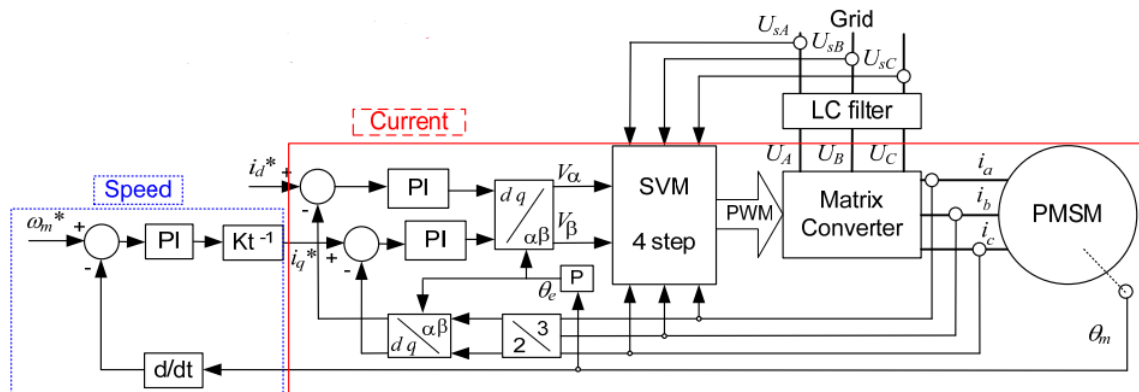


Figura 1 Esquema de blocs control FOC [11]

La figura 1 mostra el esquema de blocs de funcionament del control FOC on es pot observar la necessitat del coneixement del angle per la realimentació dels dos llaços de control que el formen, el de corrent i el de velocitat.

Per tant els sensors de posició i de velocitat son totalment necessaris. [10] [16] [24]

2.2. Resolver

Per tant com s'ha vist per realitzar un control FOC d'un motor es necessari el coneixement de l'angle del motor i de la velocitat de rotació.

La solució aportada en el motor que s'utilitza en aquest treball es un resolver.

Un resolver es un sensor analògic de rotació, per tant la seva resolució teòrica es infinita a diferencia de altres sensors amb la mateixa finalitat com podria ser un encoder incremental.

El funcionament d'un resolver ve definit per tres bobines que el formen, una primària i dues de secundaries. La primària generalment es troba en el rotor del sensor, es a dir, en el eix del motor. Les bobines secundaries per altra banda es troben situades a 90° l'una respecte de l'altra com es pot veure en la figura 2, amb aquesta configuració s'obté en una bobina un sinus i en l'altra un cosinus.

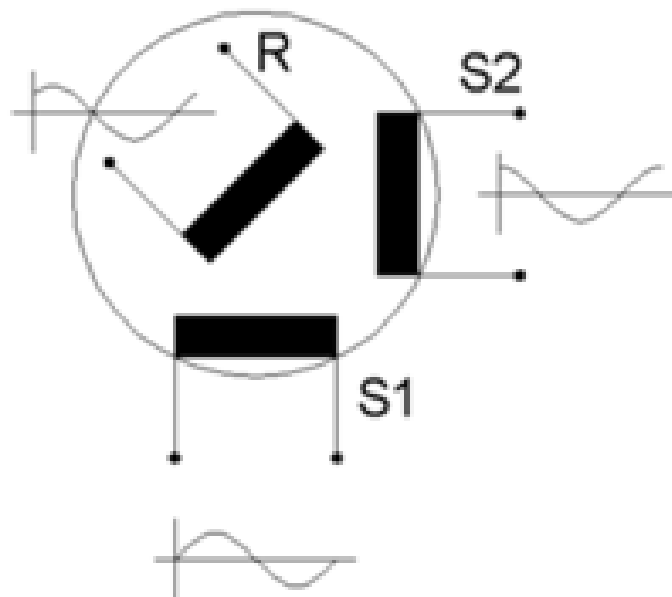


Figura 2 Esquema de la disposició de les bobines d'un resolver [9]

Aquests senyals variaran la seva amplitud, com es veu en la figura 3, depenent del angle en que es troba la bobina primària i la freqüència es mantindrà igual a la d'excitació de la primària.

Aquestes senyals permeten que matemàticament i de forma molt senzilla es calculi el angle i la velocitat de rotació. [7][8][15]

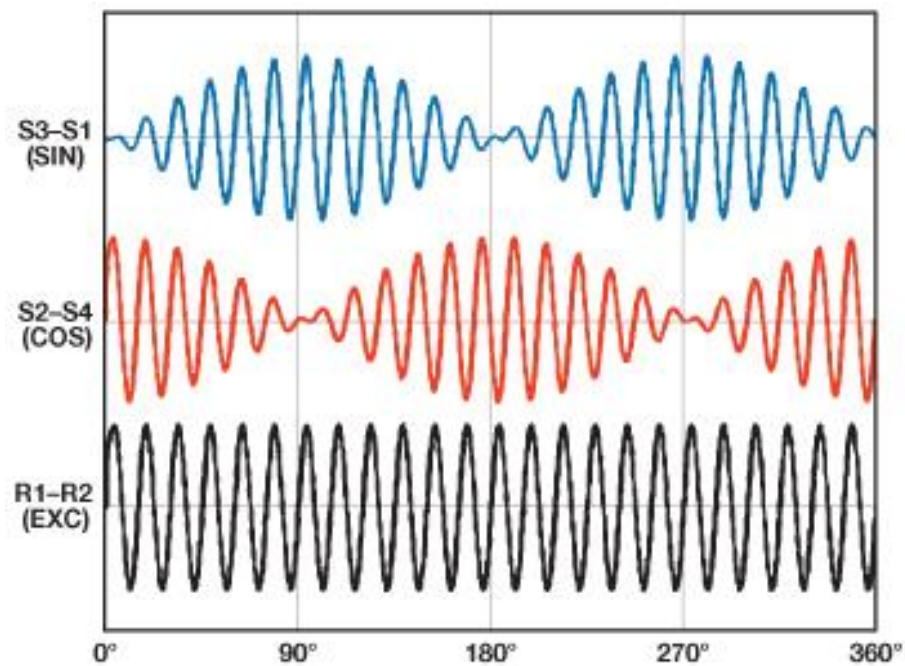


Figura 3 Representació de la senyal d'excitació (negre), sinus induït (blau) i cosinus induït (vermell) d'un resolver [6]

2.3. Comunicació digital

En aquest estudi previ es tractaran alguns dels mètodes de comunicació digital, començant pels més senzills com es la comunicació paral·lela i acabant amb CAN Bus que és un dels més utilitzats en el sector del automòbil i la indústria.

2.3.1. Comunicació paral·lela

En la transmissió de dades, la comunicació paral·lela és un mètode de transmissió simultània de múltiples díbits binaris (bits). Contrasta amb la comunicació en sèrie, que només transmet un sol bit a la vegada.

La diferència bàsica entre un canal de comunicació paral·lela i una sèrie és el nombre de conductors elèctrics utilitzats a la capa física per transmetre els bits. La comunicació paral·lela implica més d'aquests conductors. Per exemple, un canal paral·lel de 8 bits transmetrà vuit bits (o un byte) simultàniament, mentre que un canal en sèrie transmetrà aquests mateixos bits de forma seqüencial, un a la vegada. Si els dos canals funcionaven a la mateixa velocitat de rellotge, el canal paral·lel seria vuit vegades més ràpid. Un canal paral·lel pot tenir conductors addicionals per a altres senyals, com ara un senyal de rellotge per ajustar el flux de dades o un senyal per controlar la direcció del flux de dades.

2.3.2. SPI

SPI (Serial Peripheral Interface) és una comunicació en sèrie de tipus síncron, és a dir, utilitza un senyal de rellotge dedicat per sincronitzar el transmissor i el receptor o el Master i Slave, en termes SPI. El transmissor i el receptor estan connectats amb línies de dades i rellotge separades i el senyal del rellotge ajudarà al receptor a interpretar les dades rebudes, es a dir, per cada cicle del rellotge s'envia un bit, com es pot veure a la següent representació.

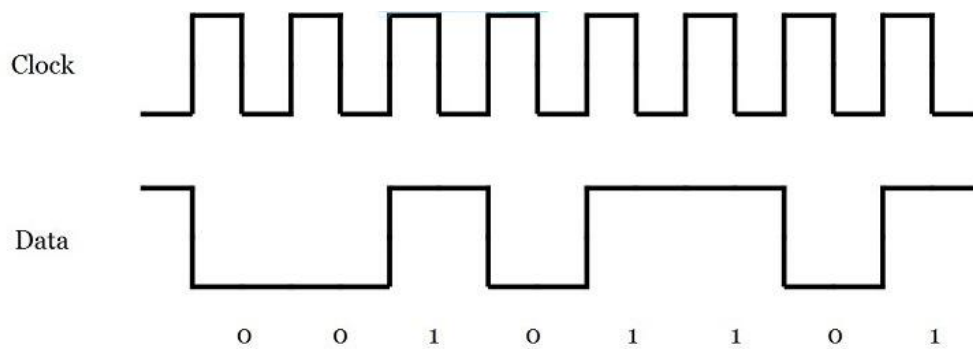


Figura 4 Representació del Clock i Data de la comunicació SPI [1]

Al protocol SPI, els dispositius estan connectats en una relació Master-Slave en una interfície de diversos punts. En aquest tipus d'interfície, es considera un dispositiu el mestre del bus i es consideren esclaus tots els altres dispositius.

Al protocol SPI, només hi pot haver un dispositiu mestre, però molts esclaus.

Les quatre senyals que formen el bus SPI són les següents:

- SCLK: Es el "clock" que sincronitza tots els dispositius que es comuniquen.
- MOSI: Master Output Slave Input, com indica el seu nom es el port que el màster utilitza per enviar dades i el slave per rebre-les.
- MISO: Master Input Slave Output es el invers del MOSI, aquest es pel que envia les dades el slave i pel que les rep el màster.
- SS: Aquest bit determina quin dels múltiples esclaus que estan connectats al bus es el seleccionat.

Per tant la connexió entre dispositius quedaria com en la següent representació.

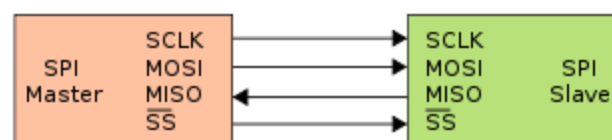


Figura 5 Connexió entre dos dispositius SPI

2.3.3. I2C

El bus I2C requereix únicament dos cables per al seu funcionament, un per al senyal de rellotge (CLK) i un altre per a l'enviament de dades (SDA), la qual cosa és un avantatge enfront del bus SPI. Per contra, el seu funcionament és una mica més complex, així com l'electrònica necessària per implementar-la.

Al bus cada dispositiu disposa d'una direcció, que s'utilitza per accedir als dispositius de forma individual. Aquesta adreça pot ser fixada per maquinari o totalment per programari.

El bus I2C té una arquitectura de tipus mestre-esclau. El dispositiu mestre inicia la comunicació amb els esclaus, i pot enviar o rebre dades dels esclaus. Els esclaus no poden iniciar la comunicació (el mestre ha de preguntar-los), ni parlar entre si directament.

És possible disposar de més d'un mestre, però només un pot ser el mestre cada vegada. El canvi de mestre suposa una alta complexitat, per la qual cosa no és una cosa freqüent.

El bus I2C és síncron. El mestre proporciona un senyal de rellotge, que manté sincronitzats a tots els dispositius del bus. D'aquesta manera, s'elimina la necessitat que cada dispositiu tingui el seu propi rellotge, d'haver de acordar una velocitat de transmissió i mecanismes per mantenir la transmissió sincronitzada.

L'esquema de connexions resulta com el següent, es pot apreciar que s'utilitzen resistències pull-up tot i que aquestes a vegades són implementades per la pròpia programació dels integrats però resulta una resistència inadequada que pot generar senyals molt lentes per tant es recomanable utilitzar-les externes.

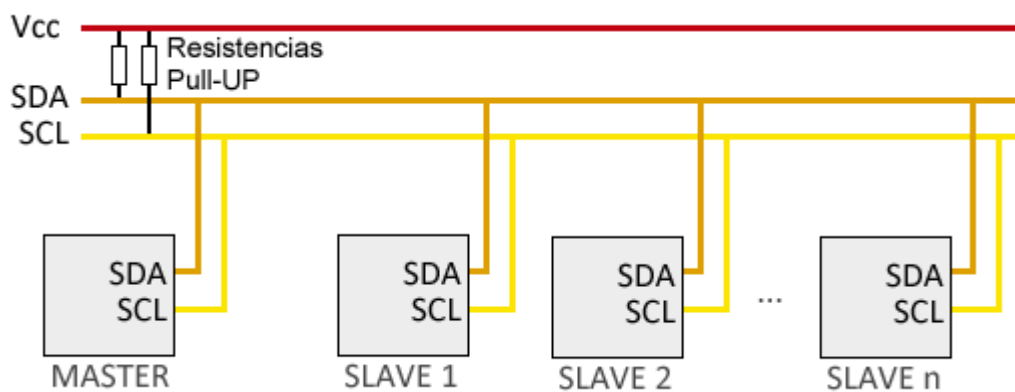


Figura 6 Connexió entre dispositius I2C [2]

2.3.4. CAN Bus

CAN és un bus de comunicacions en sèrie definit per l'Organització Internacional de Normalització (ISO), desenvolupat originalment per a la indústria de l'automòbil per substituir el complex arnès de cablejat amb un bus de dos fils.

El bus CAN està format per nodes, cada un d'aquests té un controlador host que és responsable del funcionament del node respectiu. A més del controlador host, cada node té un controlador CAN i un transceptor CAN. El controlador CAN converteix els missatges dels nodes d'acord amb els protocols CAN per ser transmesos a través del transceptor CAN pel bus sèrie i viceversa.

CAN no segueix l'arquitectura mestre-esclau, cosa que significa que tots els nodes tenen accés per llegir i escriure dades al bus CAN. Quan el node està a punt per enviar dades, comprova la disponibilitat del bus i escriu un frame CAN a la xarxa.

Un missatge CAN es compon de 10 bytes de dades. Les dades s'organitzen en una estructura específica anomenada frame i la informació transportada a cada byte es defineix en el protocol CAN. Els protocols són generalment de dos tipus: basats en adreces i basats en missatges.

En un protocol basat en adreces, els paquets de dades contenen l'adreça del dispositiu de destinació per al qual s'estableix el missatge. En un protocol basat

en missatges, cada missatge s'identifica mitjançant un identificador únic predefinit en lloc de les adreces de destinació. Tots els nodes de CAN reben el frame i depenent de l'ID del node el protocol CAN del mateix node decideix si accepta el frame o no. Si diversos nodes envien el missatge al mateix temps els nodes de prioritat més baixos esperen fins que el bus estigui disponible. [4]

3. Disseny PCB

3.1. Característiques del TS2640N441E26

Pel disseny de la PCB s'han de tenir en compte les característiques del resolver integrat en el motor, el TS2640N441E26 [25].

Segons el datasheet el voltatge d'entrada ha de ser 10Vrms a 4.5kHz, es a dir un sinus amb voltatge màxim 14.14V o 28.28V pic a pic.

El consum de corrent de la bobina primària es de 25mA per tant el integrat de sortida ha de ser capaç de donar aquesta corrent.

El ràtio de transformació del sensor es de 0.5 per tant el voltatge de sortida és de 14.14V de pic a pic.

I altres dades menys importants en el disseny com ara un voltatge dielèctric en CA de 500V durant un minut o una velocitat de operació màxima de 10.000 min⁻¹.

3.2. Esquema general

Assolides ja les característiques necessàries de funcionament i les característiques del sensor que integra el motor es hora de plantejar els elements que es faran servir en la placa, es per això que es fa el següent esquema de blocs on es pot veure tant els blocs per utilitat com el voltatge al que treballaran.

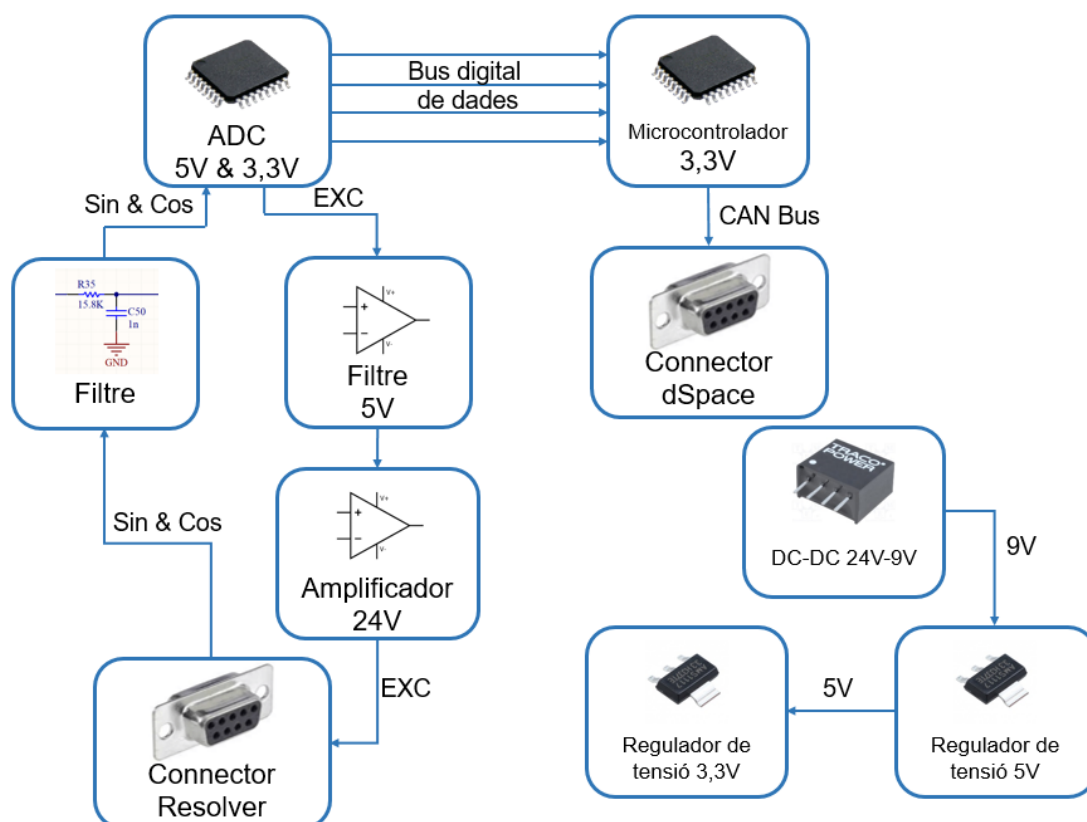


Figura 7

Esquema general

3.3. Comunicacions

L'objectiu del projecte es la comunicació entre la placa de la lectura del sensor i la dSpace que controla el motor.

Per aquesta finalitat tots els protocols de comunicació que s'han tractat en el apartat de State of the Art són vàlids, de tota manera el protocol que s'utilitzarà es el CAN Bus, això es perquè es un protocol que aporta molta robustesa a la comunicació pel seu tractament de la senyal i perquè es un sistema molt utilitzat en la indústria i en el automòbil, àmbits en el que es pot encabir aquest projecte.

3.4. Filtratge

Uns dels blocs que més varietat poden presentar a l'hora del disseny es els de filtratge.

Segons el esquema de la figura 8 necessitarem dos filtres diferencials amb guany < 1 i dos filtres actius amb guany < 1 .

Aquests filtres permetran, en el primer cas, la neteja de la senyal donada pel sensor de la que s'evitaran altes freqüències generades pel motor i altres sorolls externs mentre que els filtres actius, situats en les senyals d'excitació, eliminaran altes freqüències generades per sorolls i suavitzaran alhora la senyal sinusoidal discreta generada pel integrat.

Els filtres diferencials són els que filtren la entrada dels sinus i cosinus a la placa abans d'entrar al ADC, aquests podrien ser tant actius com passius però ja que el fabricant recomana un filtre passiu i un filtre diferencial actiu suposaria un estudi que no s'ha considerat en aquest treball es realitzarà la primera opció.

L'esquema del filtre es el següent, on R_A es la que determina el divisor de tensió necessari per acondicionar l'entrada a un voltatge que el integrat accepti i sigui capaç de llegir.

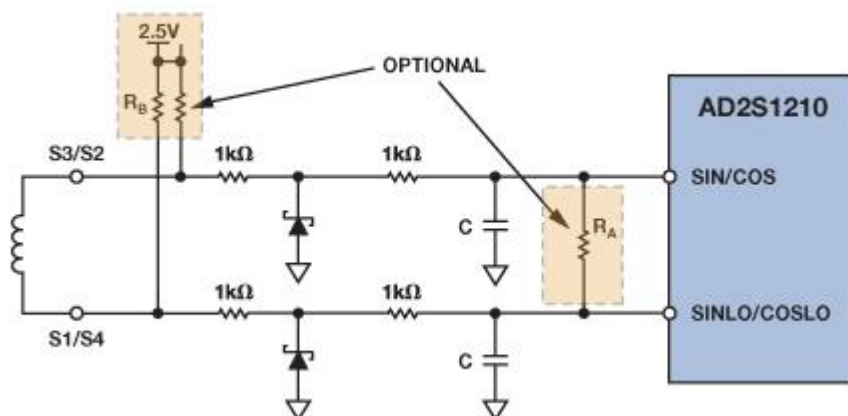


Figura 8 Esquema filtre diferencial pels sinus i cosinus d'entrada [14]

Les resistències en sèrie i els díodes proporcionen una protecció per reduir la energia d'events externs com ara ESD o curtcircuits amb GND o VCC.

Les resistències amb els condensadors formen un filtre passa baixos de primer ordre que segueixen la següent fórmula.

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C}$$

Partint de l'esquema basic anterior i tenint en compte una freqüència de tall de 10kHz i un guany de 1, s'obté un valor de resistència de 2K, es a dir cada una de 1K i un condensador de 6.8nF.

La següent figura en mostra el esquema definitiu. També s'observa que hi ha una resistència per utilitzar com a divisor de tensió de la que es valorarà el seu us al realitzar els tests.

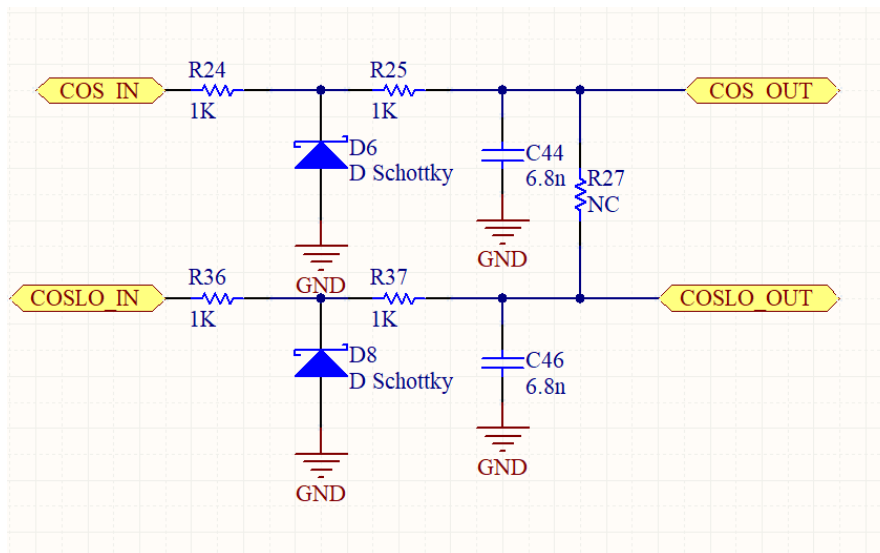


Figura 9 Filtre diferencial

Per altra banda, els filtres actius són com ja s'ha dit tractaran les dos senyals d'excitació del resolver, aquestes senyals són dos senyals sinusoïdals de freqüència fixa per tant s'ha de filtrar per sobre d'aquesta però amb un marge per no afectar a les freqüències límit. Alhora la sortida d'aquest filtre ha de ser de 14.14V pic a pic cada una ja que l'integrat triat genera una senyal desplaçada 180° respecte l'altra, per tant quan s'agafa una com a referencia i l'altra com a senyal s'obté un sinus en corrent alterna dels dos voltatges de les senyals sumats, es a dir 28.28V pic a pic.

Aquest tractament es farà amb dos op-amp diferents, el primer s'encarregarà del filtratge amb un esquema butterworth de tercer ordre alimentat a 5V.

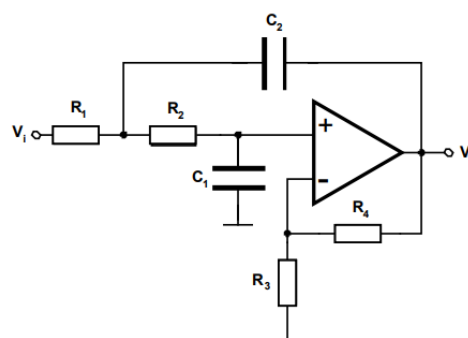
El segon té la funció de generar el guany, com que es un valor alt per un integrat no s'aplica aquest guany juntament amb el filtre per tal de obtenir un millor filtratge, per tant aquest segon genera el guany i és alimentat a 24V per ser capaç de donar les sortides de voltatge necessàries. Alhora aquest últim op-amp ha de ser capaç de proporcionar la corrent de funcionament del resolver de 25mA.

La estructura utilitzada en el filtre serà la següent:

$$K = 1 + \frac{R_4}{R_3}$$

$$a_1 = \omega_c [C_1(R_1 + R_2) + (1 - K)R_1C_2]$$

$$b_1 = \omega_c^2 R_1 R_2 C_1 C_2$$



On K és el guany, que considerarem unitari, i a1 i b1 són valors extrets de la taula dels filtres butterworth que es pot trobar als annexes. A aquest esquema s'hi ha de afegir el filtre passiu després del actiu per assolir el tercer ordre.

Gracies a les taules normalitzades dels filtres butterworth sabem que en la etapa activa a=1 i b=1 mentre que al filtre passiu els valors son a=1 i b=0.

Amb això obtenim els següents valors de components per assolir una freqüència de tall de aproximadament 10kHz.

Filtre passiu:

- R=10K
- C=1.5n

Filtre actiu:

- R1=2.2k
- R2=2.2k

- C1=3.3nF
- C2=15nF

A la següent figura es veu el esquema definitiu d'aquest filtre.

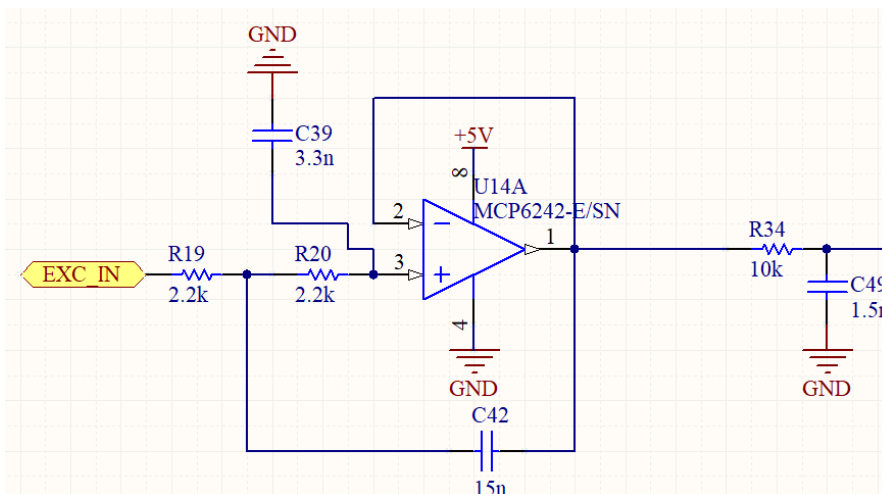
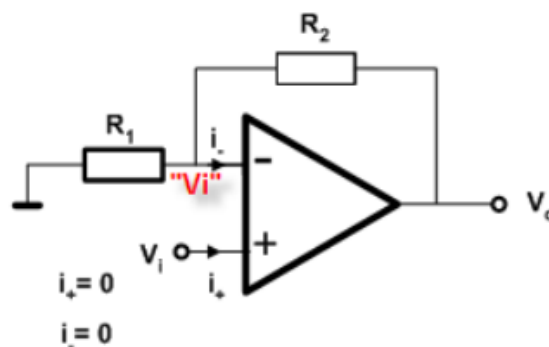


Figura 10 Esquema filtre butterworth 3r ordre

A aquest esquema s'hi ha de afegir el guany que segueix el següent dibuix de op-amp amplificador no inversor.

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_i$$



Tenint en compte el petit guany negatiu que es produeix en el filtre el guany desitjat és de 4 aproximadament.

Per tant els valor de resistència són R1=3.3K i R2=10K.

La següent figura mostra el esquema final del amplificador.

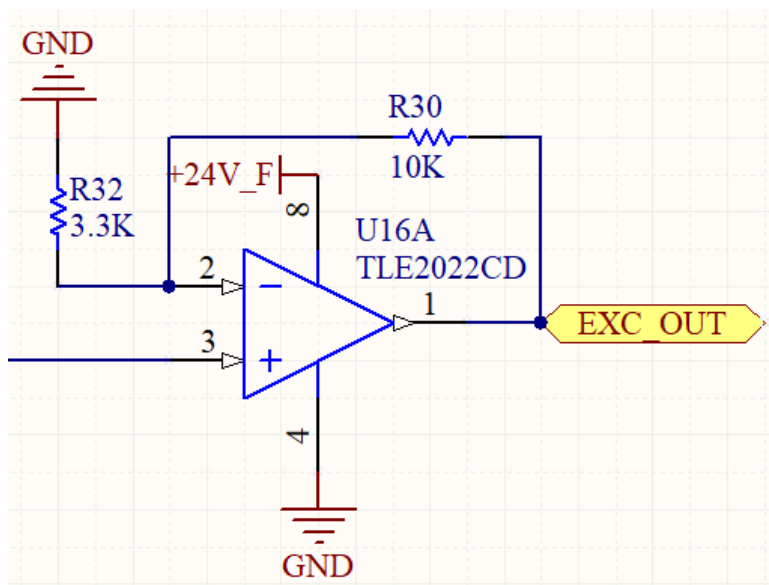


Figura 11 Esquema amplificador no inversor

3.5. Tria de components

Ara que ja es té l'esquema general de funcionament i s'ha fet l'estudi previ sobre els filtres i l'acondicionament de les senyals ja es pot fer la tria de components principals que s'utilitzaran en la placa. Per aquesta tria s'ha tingut en compte el compliment de requeriments del disseny alhora que l'ús de components SMD tot i que utilitzant footprints que es puguin soldar a ma per assegurar una fabricació correcta, no s'ha tingut en compte el preu dels components en grans quantitats ja que l'objectiu no és el disseny d'un producte comercialitzable sinó d'un prototip.

3.5.1 ADC

El component principal en aquesta placa serà el integrat que es comuniqui amb el resolver.

El que s'ha triat és el d'un fabricant conegut i amb bon renom com és Analog Devices, es tracta del AD2S1210ASTZ [27] que té les següents característiques:

- Genera el sinus d'excitació del resolver a freqüència programable (entre 2kHz i 20kHz).
- Compatible amb SPI i Comunicació digital paral·lela.
- Alimentació a 5V.
- Fins a 16 bits de resolució.
- Detecció d'errors
- Velocitat màxima de lectura de 3125 rps
- Package 48 LQFP

Totes aquestes característiques s'adeqüen a les necessitats del resolver i el package utilitzat és SMD però es pot soldar a ma per tant és idoni per aquesta aplicació.

3.5.2 Microcontrolador

El microprocessador és l'encarregat de la lectura dels valors al ADC, el processat d'aquests valors (si és necessari), la configuració del ADC i de la comunicació mitjançant CAN bus amb la dSpace.

Els principals fabricants de microprocessadors són:

- NXP
- Texas Instruments
- Microchip
- ST Microelectronics

D'aquests fabricants s'ha filtrat segons els nostres requisits i s'han obtingut els següents possibles microcontroladors.

Fabricant	Model
NXP [17]	Sèrie KV10
Texas Instruments [18]	TMS320F280049
Microchip [19]	Sèrie PIC24
Microchip [20]	Sèrie ATSAME51
ST Microelectronics [21]	Sèrie STM32F0
ST Microelectronics [22]	Sèrie STM32F4

Taula 1 Possibles microcontroladors a utilitzar

A l'hora de decidir quin s'utilitzarà s'ha realitzat una taula multi criteri on es tindran en compte els següents punts en la decisió:

- **Freqüència:** La freqüència a la que funciona el MCU i que determinarà la velocitat de processament del integrat. Aquest no es un punt crític per tant se li dona un multiplicador de 1.
- **Bits:** Amplada de bus de dades. Tot i que es treballa millor amb MCUs de 32 bits també es considera una de 16 bits i se li dona un multiplicador de 2.
- **Package:** És el footprint utilitzat pel component. Aquest determinarà la facilitat de soldatge que vindrà donada pel tipus de footprint i per la quantitat de potes del integrat. Se li dona un multiplicador de 4.
- **Preu:** Preu unitari del component. Se li dona un multiplicador de 2.

- **Coneixement previ:** En aquest punt es té en compte si s'ha utilitzat el integrat prèviament ja que això li aporta robustesa al projecte. Se li dona un multiplicador de 5.
- **Utilització en la indústria:** Aquest apartat li dona importància a si és un integrat utilitzat i preparat per la indústria. Se li dona un multiplicador de 4.
- **Recursos web:** En aquest apartat es considera la quantitat de informació disponible a la web sobre el MCU tant tutorials com fòrums com programes.

Per tant la taula amb la informació extreta del fabricant per cada punt queda així:

	Sèrie KV10	TMS320F280049	Sèrie PIC24	Sèrie ATSAME51	Sèrie STM32F0	Sèrie STM32F4
Freqüència	75MHz	100 MHz	60 MHz	120 MHz	48 MHz	168 MHz
Bits	32 bits	32 bits	16 bits	32 bits	32 bits	32 bits
Package	LQFP 48	LQFP 64	TQFP 100	TQFP 64	LQFP 48	LQFP 64
Preu	3,66 €	9,44 €	8,05 €	5,27 €	3,11 €	9,24 €
Coneixement previ	0	0	0	0	10	10
Utilització en la indústria	10	10	0	0	10	10
Recursos web	5	5	10	10	10	10

Taula 2 Informació taula multi criteri

Puntuats els apartats i aplicades les multiplicacions la taula resultant és la següent:

	Multiplicador	Sèrie KV10	TMS320 F280049	Sèrie PIC24	Sèrie ATSAME51	Sèrie STM32F0	Sèrie STM32F4
Freqüència	1	7	8	7	9	6	10
Bits	2	10	10	5	10	10	10
Package	4	10	7	5	6	10	7
Preu	2	10	6	7	8	10	6
Coneixement previ	5	0	0	0	0	10	10
Utilització en la indústria	4	10	10	0	0	10	10
Recursos web	5	5	5	10	10	10	10
Resultats		152	133	101	119	226	210

Taula 3 Taula multi criteri

Per tant els dos millors resultats són els del fabricant ST Microelectronics, ja que tots dos compleixen tots els requisits s'optarà pel STM32F0 ja que és el que te la màxima puntuació. Concretament el que s'utilitzarà serà el STM32F072CB.

3.5.3. Filtres

A l'hora de triar els op-amp dels filtres s'ha tingut en compte que siguin duals, ja que es tenen dos circuits paral·lels de filtres, que tinguessin un empaquetat SOIC 8 que s'utilitza molt freqüentment, que disposessin d'una velocitat d'operació suficient, que poguessin donar suficient potencia i que operessin als voltatges desitjats.

Així és com s'han triat els següents dos op-amp, el primer es farà operar a 5V metre que el segon a 24V ja que és el que amplifica el voltatge al necessari per fer operar el resolver.

Op-amp	Voltatge d'alimentació única
MCP6242-E/SN	5V
OPA2172IDR	24V

Taula 4 Op-amps utilitzats en el projecte

3.5.4. Alimentació

Com s'observa en el esquema general s'utilitzen 4 voltatges diferents, 24V, 9V, 5V i 3.3V.

Els 24V seran els de l'entrada de l'alimentació, aquests 24V baixaran a 9V amb un DCDC no aïllat. Es baixa a 9V i no a un valor més baix perquè així ens assegurem que els següents reguladors tenen el voltatge mínim per operar. El DCDC Utilitzat accepta entrades de 12V a 36V.

Com ja s'ha dit els 5V s'obtindran amb reguladors de tensió que s'alimentaran de la sortida del DCDC. En aquest cas hi haurà dos reguladors ja que s'alimentarà de manera separada el ADC de la resta i aquest te un consum de potencia inferior a els altres 5V utilitzats.

Finalment aquests 5V passaran a 3.3V amb un altre regulador de tensió.

La següent taula mostra els components utilitzats en cada salt:

Voltatge	Component	Potencia
24V - 9V	TSR 2-2490	18W
9V - 5V	MC78M05ACDTG	3.5W
	UA78M05CDCY	2.5W
5V - 3.3V	UA78M33CDCY	1.65W

Taula 5 DCDC i reguladors de voltatge utilitzats en el projecte

3.5.5 Connectors

Finalment en el cas dels connectors s'han de decidir tres connectors.

Per l'alimentació s'utilitzarà un bloc terminal amb pas de 2.54mm i que aguanta fins a 6A per pin que és una corrent que mai s'arribarà a consumir.

La connexió amb el resolver ve marcada pel fabricant del motor i s'utilitza un connector DB9.

Finalment per la connexió del protocol CAN amb la dSpace s'utilitzarà també el connector DB9 ja que és el que s'utilitza freqüentment en la indústria per aquesta comunicació.

3.6. Schematics

Els schematics, o esquemàtics en català, són aquells documents que plasmen els dissenys electrònics. Mostrant els components exactes que s'utilitzaran, els seus pins, numerats segons el datasheet del fabricant, i el connexionat entre ells que es fa mitjançant línies o etiquetes que enllacen tots els punts que tinguin la mateixa etiqueta.

Aquest treball s'ha organitzat en 5 categories de schematics diferents es a dir 5 pàgines de schematics, aquestes 5 pàgines estan interconnectades entre si per les etiquetes.

Tots aquests esquemàtics es poden trobar als annexes juntament amb els dissenys finals de la PCB.

3.6.1. Microcontrolador

El schematic del microcontrolador esta format per el STM32F072CB del fabricant ST, un seguit de buffers del fabricant Analog Devices i el integrat necessari per el us del protocol CAN del fabricant Microchip.

Aquest últim esta compostat per dos condensadors de bypass que filtren el possible soroll de l'alimentació, el integrat i una resistència de 120 Ohms entre les dos senyals de sortida com especifica el fabricant.

Els buffers són el ADG3308BRUZ i estan alimentats per dos nets diferents, això és perquè adequa la senyal d'entrada al voltatge desitjat a la sortida i de la mateixa manera si s'utilitza al revés. Amb això es pot fer servir les senyals del controlador a 3.3V i les del ADC a 5V com recomana el fabricant.

Aquest buffer te la funció de separar les senyals que van del controlador al ADC de manera que sigui un sistema que pugui aguantar possibles sobre pics o valors no desitjats. Per tant totes les sortides i entrades del controlador passen per un dels buffers.

Finalment el centre d'aquest esquemàtic és el microcontrolador que te un array de condensadors de bypass de diferents valors per tal de cobrir la majoria de freqüències que podrien aparèixer.

A més a més aquest controlador necessita dos senyals per funcionar, el BOOT i el NRESET que seguint el que diu el fabricant han de anar connectats a una resistència de 100K connectada a GND i a un condensador de 100nF connectat a GND, respectivament.

Les connexions entre el micro i el ADC, que es poden seguir amb les etiquetes, s'han realitzat seguint el pinout que es pot trobar en el apartat de programació, aquest pinout s'ha realitzat per fer servir totes les funcions que aporta el ADC amb comunicació paral·lela ja que la programació del mateix s'ha de fer obligatòriament amb comunicació paral·lela i aquesta configuració s'aprofita per la lectura de dades.

Finalment s'habiliten 4 pins per la programació del microcontrolador, aquests són 3.3V, GND, Clock i Data Input/Output.

3.6.2. ADC

En el cas del arxiu del ADC s'hi inclou un últim buffer però que en aquest cas no separa el micro del ADC sinó que separa aquest últim de LEDs, que poden requerir corrents que el integrat no pot donar i connexions a positiu o negatiu que poden aportar sorolls a les entrades, per tant torna a complir la funció d'aportar robustesa al sistema.

També s'hi inclouen quatre lets que mostren el estat dels errors i l'estat d'encesa del microcontrolador i del sistema general.

En complementació al ADC s'hi inclou un petit integrat, ADM823, del mateix fabricant (Analog Devices) que gestiona la senyal de reset ja que a l'encesa el ADC necessita una activació del reset passats uns milisegons de la encesa, aquest integrat ho gestiona sense necessitat de més components.

Finalment aquest document inclou el ADC AD2S1210 que d'igual manera que el microcontrolador inclou un array de condensadors i en aquest cas consta d'un cristall extern de 8.192MHz tal com demana el fabricant.

3.6.3. Filtres

Aquesta tercera part dels esquemàtics consta de tots els filtres utilitzats en el disseny. Es pot veure que són els esquemes que s'han argumentat prèviament en el apartat del filtratge.

En aquest document es pot observar que s'han utilitzat dos Op-amps duals, el primer, el MCP6242-E/SN, alimentat a 5V en mode single supply i treballant en com a filtre actiu en les dos senyals d'excitació. Es pot veure que el component està marcat com U14A i U14B, la última lletra significa que tot i que es mostrin dos figures independents és tracta de un sol component.

El segon integrat és el OPA2172IDR, alimentat a 24V en mode single supply i treballa com a amplificador no inversor en les dos senyals d'excitació. Aquest component és dual de la mateixa manera que el altre op-amp.

3.6.4. Alimentació

Aquest fitxer mostra un esquema senzill on es mostra el fusible de 3A a l'entrada de l'alimentació i els diferents components de gestió i regulació del voltatge amb els condensadors en entrada i sortida marcats pel fabricant.

3.6.5. Connectors

Finalment el últim arxiu és el que mostra els tres connectors utilitzats en el sistema, el d'alimentació, el del CAN seguint el pinout marcat pel protocol en el que es fan servir només quatre dels nou pins que componen el connector DB9 utilitzat per aquesta comunicació i finalment el connector del resolver que utilitza 6 dels 9 pins disponibles del connector DB9 i que s'han disposat seguint el pinout que ofereix el fabricant del motor.

A més a més el xassís dels dos connectors s'ha connectat a GND per evitar que generin sorolls no desitjats en el sistema.

3.7. PCB

Amb els schematics acabats i verificats es hora de generar la PCB, per fer això es genera el arxiu buit i s'hi importen els cinc esquemàtics sobre els que s'ha treballat.

Amb el disseny importat s'organitza el layout de la placa i es defineixen els marges. Aquest és un apartat molt important ja que la situació dels components determinarà la facilitat de routejat, es a dir, de connexionat i en alguns casos pot implicar que no sigui viable realitzar-lo en dos capes ja que s'han de creuar massa pistes, a més a més pot suposar que les pistes sensibles a sorolls passin per zones menys aïllades com són les pistes d'alimentació.

Aquesta PCB es dissenyarà amb dos capes ja que com es podrà veure a continuació es suficient per fer tot el routejat. A més a més, en aquest disseny no es té en compte el estudi de els beneficis que podria generar una PCB de 4 o més capes en el àmbit de aïllament de sorolls externs.

En la següent figura es pot veure el primer pas de ubicació dels components i definició de la forma de la placa ja finalitzat, les línies blanques que s'observen són totes les connexions que s'han de realitzar.

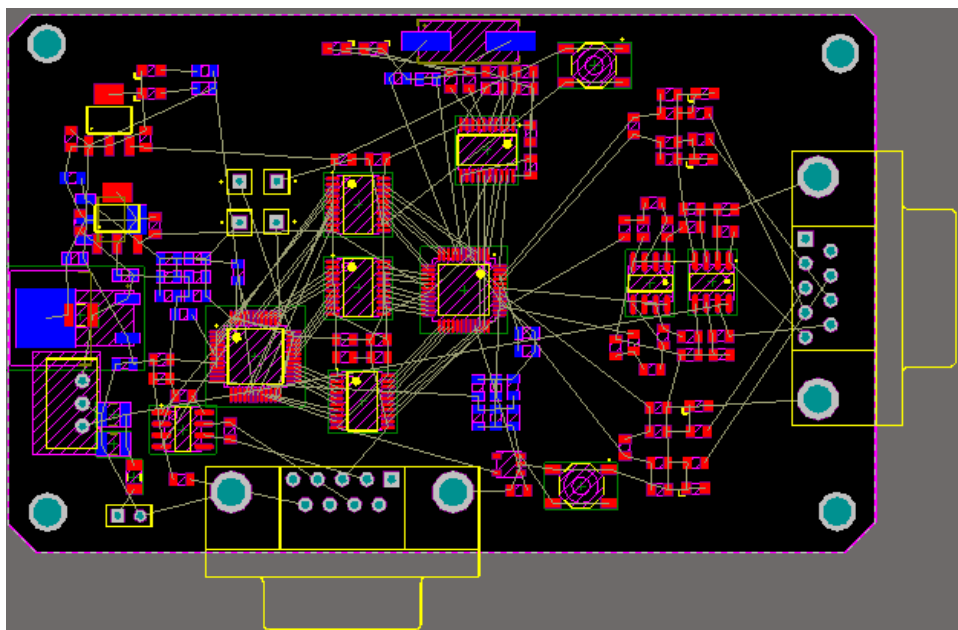


Figura 12 PCB amb els components situats

Com es pot veure per millorar la distribució alguns dels components menys crítics i de volum petit s'han posat a la capa inferior representada de color blau, mentre que la capa superior es representa amb el color vermell.

Els components s'han disposat formant tres grans grups, el de més a l'esquerra que està format pels components de l'alimentació, un central que el formen els quatre buffers, el ADC i el microcontrolador, juntament amb tots els seus condensadors i components secundaris. Finalment a la dreta s'hi situen els components del acondicionament de les senyals.

També es pot observar que els condensadors de desacoblament o bypass s'han situat a prop del component als que s'han assignat, això és per reduir el recorregut que no té la protecció d'aquests condensadors i així evitar el perjudici dels sorolls externs.

A continuació com que s'utilitzaran plans de massa tant superior com inferior connectats a GND s'amaga la xarxa de GND per tant queda un esquema de connexions molt menys aglomerat com es pot veure a la figura 13.

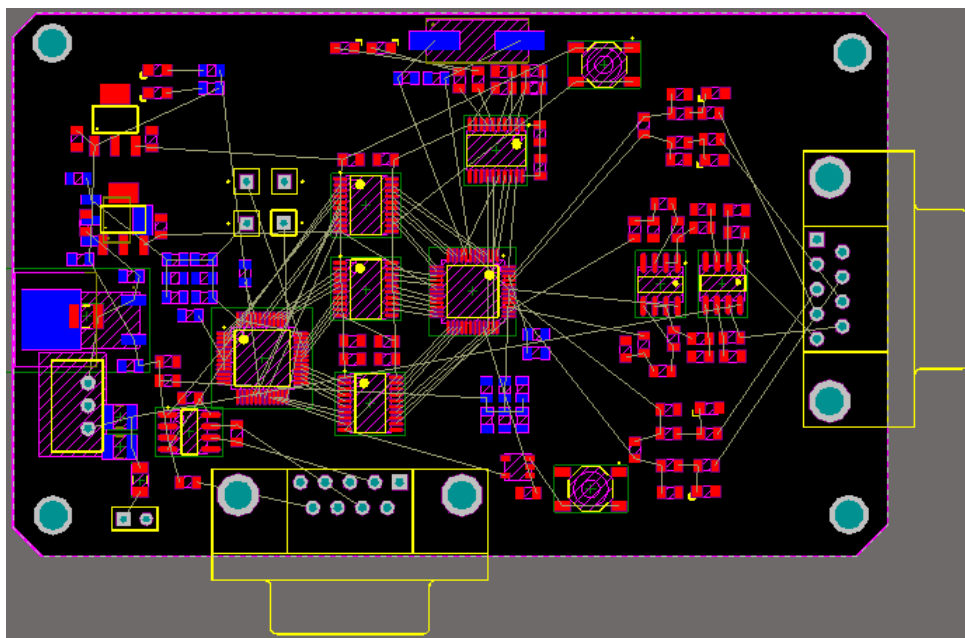


Figura 13 PCB amb la xarxa de GND amagada

El següent pas consisteix en el rotejat en el que es té en compte les amplades de les pistes segons si es tracta d'una pista de senyal o de alimentació.

El resultat de la placa ja routejada en les dos capes es pot veure a la següent figura.

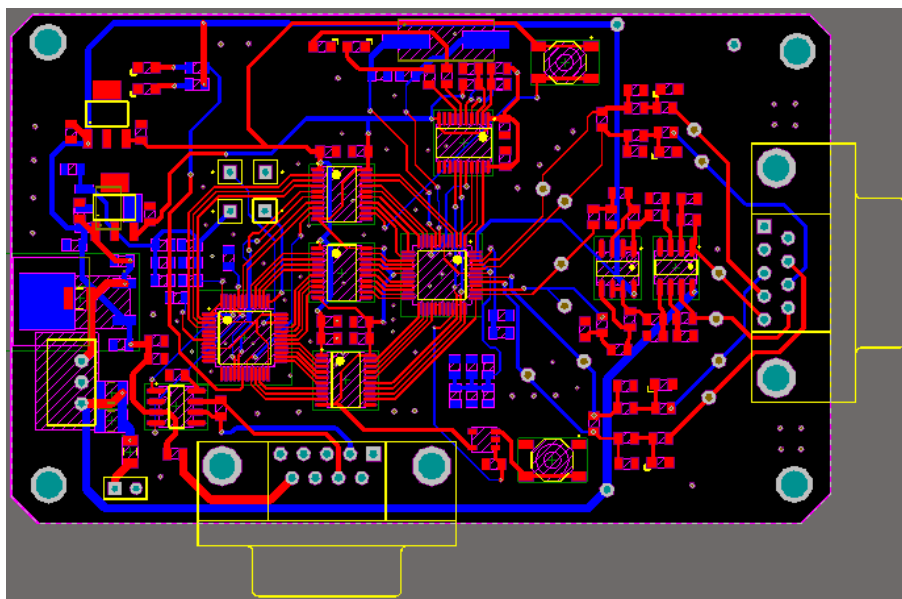


Figura 14 PCB routejada

Es pot veure que hi ha zones de la PCB, sobretot la central que tenen una densitat de vies força elevada però no ha suposat cap problema pel disseny. En la figura 13 també es pot observar que s'han afegit tres tipus de vies, que són els forats que connecten els dos costats de la PCB.

Un primer tipus de via és aquella que canvia una pista de costat per facilitar-ne el routejat, aquesta via generalment s'ha posat de tamany petit ja que no s'ha d'utilitzar per cap altra finalitat i així ja compleix la seva funció. Un segon tipus de vies són aquelles situades a la zona del acondicionat que s'han afegit a mitja pista per facilitar la inspecció amb oscil·loscopi a l'hora del testeig. Finalment s'han utilitzat vies connectades a GND per unir els dos costats de placa sense que hi hagi cap pista i això es per unir els dos plans de massa que posteriorment es posaran i que, d'aquesta manera no tenen efectes negatius al GND del sistema.

El següent pas com s'acaba de comentar es l'addició dels plans de massa superior , en vermell figura 15, i inferior, en blau figura 16.

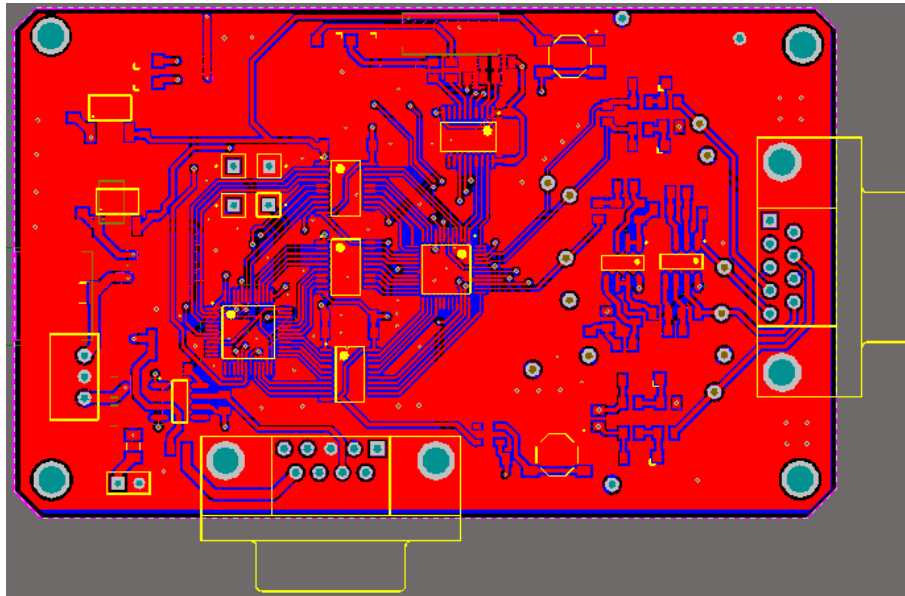


Figura 15 PCB amb pla de massa superior

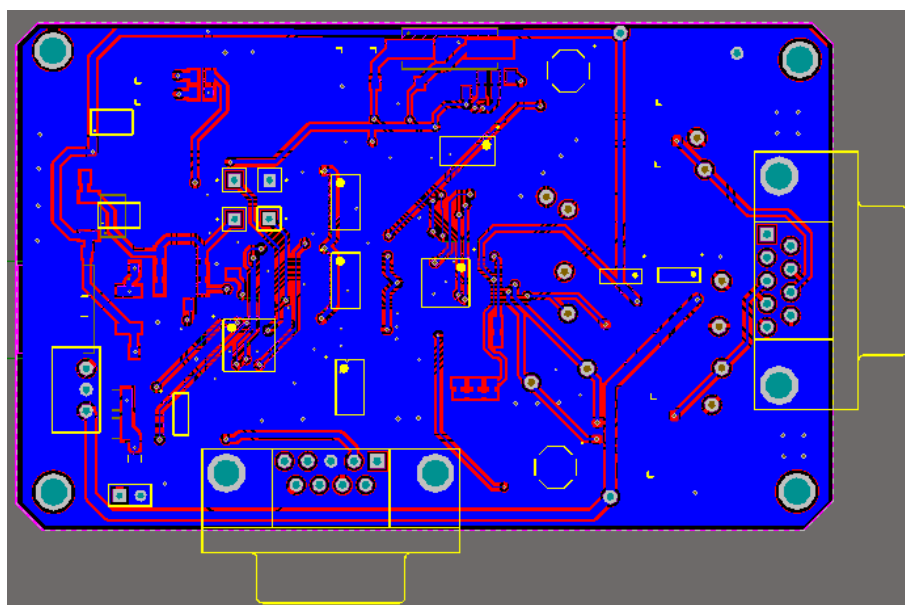


Figura 16 PCB amb pla de massa inferior

Finalment s'afegeixen les serigrafies que indiquen dades sobre els connectors, l'estat del LEDs o altres.

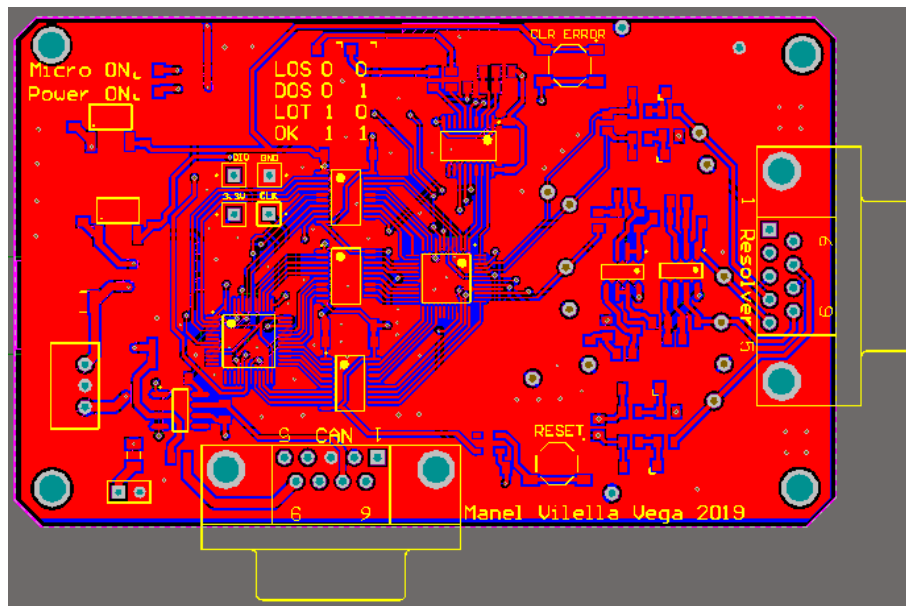


Figura 17 PCB amb serigrafies (mostrades en groc)

Amb la PCB ja finalitzada es pot generar un model en 3D que mostra també els models dels components i que donen una imatge del resultat final del disseny. Aquest resultat es pot veure en les següents dos figures.

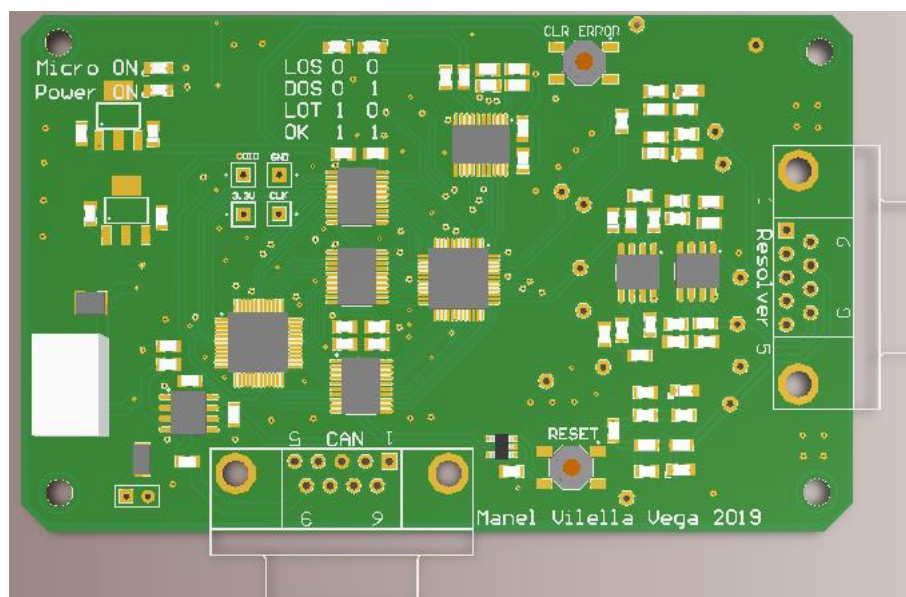


Figura 18 Representació en 3D superior de la PCB

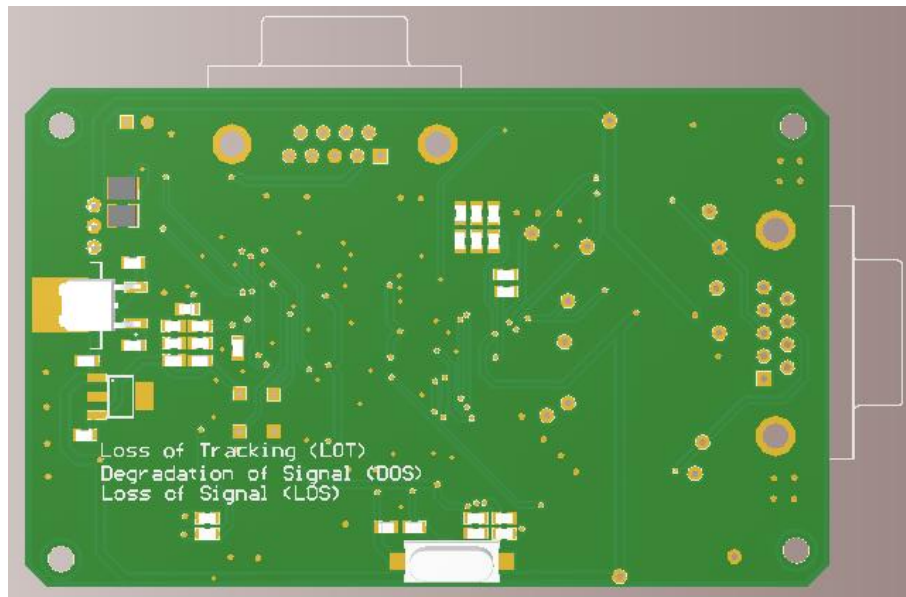


Figura 19 Representació en 3D inferior de la PCB

4. Programació

El ADC que s'ha triat porta una configuració per defecte, es a dir, una freqüència d'excitació predefinida i de mateixa manera en tots els diferents valors que defineixen el seu funcionament com poden ser els thresholds dels errors i registres de control.

Els punts que es poden modificar són:

1. Valors de reset de DOS (Degradation Of Signal)
2. Valor alt de threshold de LOT (Loss Of Track)
3. Valor baix de threshold de LOT (Loss Of Track)
4. Freqüència d'excitació
5. Registre de control

Per modificar aquests valors per defecte s'ha d'establir comunicació amb el integrat mitjançant interfície digital, indicant a traves de 8 bits l'adreça del registre i el valor de la configuració.

4.1. Configuració ADC

El AD2S1210 disposa d'un mapa de registres que es poden configurar.

Aquestes modificacions permeten que aquest integrat serveixi per gran quantitat de resolvers i aplicacions diferents ja que no aporta una única solució i tots els paràmetres importants són configurables.

Aquesta configuració es fa mitjançant els bits D0 a D7, sent D0 el LSB, però no només s'utilitzen aquests pins per comunicar-se amb els registres, el següent esquema mostra tots els pins necessaris.

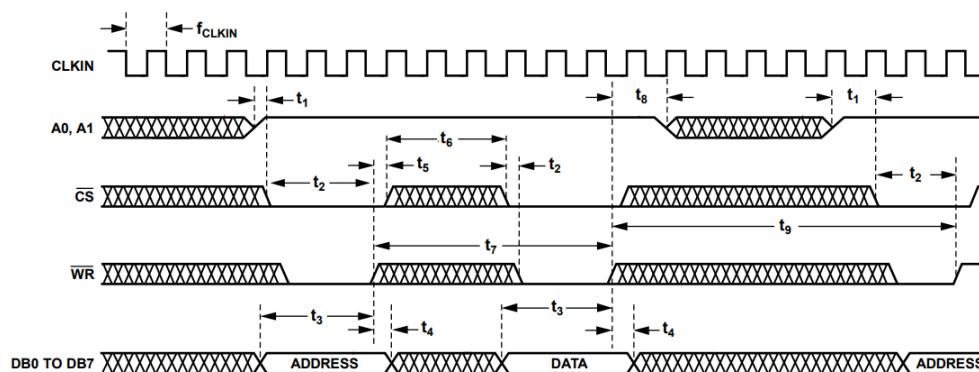


Figura 20 Representació dels pins utilitzats i temps necessaris per la comunicació paral·lela amb el ADC

Tal com s'ha dit el gràfic mostra els pins utilitzats, com són els A0, A1, CS i WR però també es mostra el ordre d'utilització d'aquests i els temps mínims que venen referenciats per la figura 21.

Parameter	Description	Limit at T_{MIN} , T_{MAX}	Unit
f_{CLKIN}	Frequency of clock input	6.144 10.24	MHz min MHz max
t_{CK}	Clock period ($= 1/f_{CLKIN}$)	98 163	ns min ns max
t_1	A0 and A1 setup time before $\overline{RD}/\overline{CS}$ low	2	ns min
t_2	Delay \overline{CS} falling edge to $\overline{WR}/\overline{FSYNC}$ rising edge	22	ns min
t_3	Address/data setup time during a write cycle	3	ns min
t_4	Address/data hold time during a write cycle	2	ns min
t_5	Delay $\overline{WR}/\overline{FSYNC}$ rising edge to \overline{CS} rising edge	2	ns min
t_6	Delay \overline{CS} rising edge to \overline{CS} falling edge	10	ns min
t_7	Delay between writing address and writing data	$2 \times t_{CK} + 20$	ns min
t_8	A0 and A1 hold time after $\overline{WR}/\overline{FSYNC}$ rising edge	2	ns min
t_9	Delay between successive write cycles	$6 \times t_{CK} + 20$	ns min
t_{10}	Delay between rising edge of $\overline{WR}/\overline{FSYNC}$ and falling edge of \overline{RD}	2	ns min

Figura 21 Temps necessaris per la comunicació paral·lela amb el ADC

Es a dir que el codi ha de tenir en compte els temps morts i el ordre de les diferents configuracions.

Aquesta configuració es pot aplicar als següents registres.

1. Valors de reset de DOS (Degradation Of Signal)

El ADC guarda contínuament els valors mínims i màxims de la senyal en registres interns. Aquests valors permeten fer un seguiment de la senyal per detectar així quan hi ha una degradació de la mateixa, es a dir que si el valor actual està per fora dels límits marcats es detecta un error DOS. Els valors predefinits són 3.99V de màxima i 2.28V de mínima, valors que es consideren acceptables en aquest cas.

2. Valor alt de threshold de LOT (Loss Of Track)

En aquest cas el que es determina és el valor màxim de desplaçament de la senyal, el valor predefinit és 2.5 graus, valor que es considera acceptable també, per tant no fa falta assignar-li un nou valor al registre.

3. Valor baix de threshold de LOT (Loss Of Track)

En aquest cas el que es determina és el valor màxim de desplaçament de la senyal, el valor predefinit és 0.5 graus, valor que es considera acceptable també, per tant no fa falta assignar-li un nou valor al registre.

4. Freqüència d'excitació

Aquest és el primer dels registres que no controla possibles errors, aquest registre controla la freqüència a la que es genera el sinus d'excitació del resolver.

Aquest valor de freqüència depèn del resolver utilitzat.

Per a configurar els 4,5kHz utilitzats primer s'ha d'enviar la adreça corresponent als bits D7 a D0 sent el bit D7 el MSB. Aquesta adreça la indica el datasheet del ADC i és 0x91 en Hexadecimal.

El següent es envia el valor de la freqüència desitjada en hexadecimal també i això s'obté amb la següent formula donada pel fabricant.

$$FCW = \frac{4.5kHz * 2^{15}}{8.192 MHz} = 12 (HEX)$$

Per tant el següent missatge a enviar és 0x12. I amb això ja queda configurada la freqüència de excitació.

5. Registre de control

Aquest últim registre configura altres aspectes del funcionament del integrat.

Els aspectes que controla es veuen en la següent taula juntament amb el bit que els configura.

Bit	Descripció
D7	Address/data bit
D6	Reserved; set to 1
D5	Phase lock range 0 = 360°, 1 = $\pm 44^\circ$
D4	0 = disable hysteresis, 1 = enable hysteresis
D3	Set Encoder Resolution EnRES1
D2	Set Encoder Resolution EnRES0
D1	Set Resolution RES1
D0	Set Resolution RES0

Taula 6 Bits del registre de control

El fabricant també diu que els valors per defecte són els que corresponen al valor 0x7E.

Els únics valors que es modificaran aquí respecte els predeterminats són els del encoder que es posaran a 0 ja que no s'utilitza i els que determinen la resolució desitjada, es a dir la de 16 bits.

Per tant el valor obtingut en binari és 01110011 que correspon a 0x73.

Aquesta configuració s'aplicarà com en el cas de la freqüència, enviant la adreça (0x92) i les dades (0x73).

Amb aquest últim registre queda tot el ADC configurat com es necessari per aquest cas.

4.2. Esquema general de funcionament

Quan ja es té la configuració realitzada s'ha de planificar el funcionament del codi per tenir un codi net i ben organitzat.

El següent esquema mostra el funcionament que tindrà el codi mostrant el ordre de funcionament i les accions paral·leles que s'executaran.

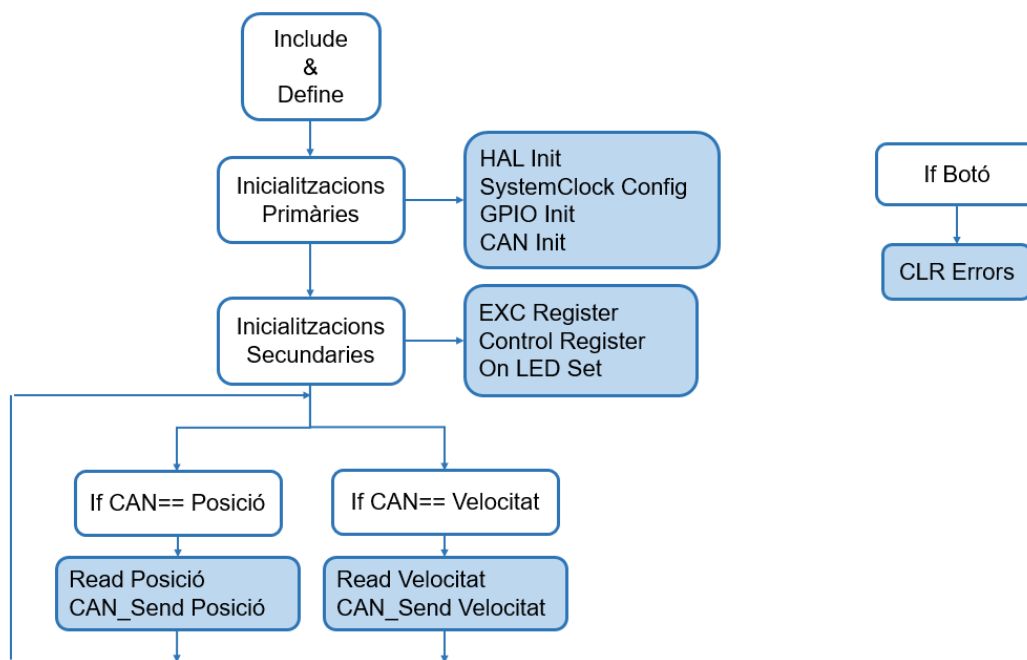


Figura 22 Esquema general de funcionament del codi del microcontrolador

4.3. Inicialització del codi

La primera part del codi del microcontrolador consisteix en el linkatge de les llibreries i la inicialització de totes les funcions utilitzades durant el codi, com són el clock, els GPIO i la comunicació CAN.

El fabricant del microcontrolador utilitzat ofereix un programa que genera el codi en llenguatge C, aquest programa ST CUBEMX necessita uns inputs que consisteixen en els paràmetres de les funcions i els pins utilitzats del encapsulat per cada funció.

Per aquesta assignació es necessita la següent taula que mostra el pinout del microcontrolador alhora que mostra les connexions amb el ADC.

PIN ADC	AD2S121 0	PIN ST M	STM32F072C B	High/ Low	IN/ OUT (STM)	Funció
1	RES1			LH		Resolució de 16 bits
2	CS			L		El dispositiu esta actiu quan esta en valor Low
3	RD	2	PC15		O	Read-> L Write-> H
4	WR/FSYN C	46	PC14		O	H when RD-> L
5,1 9	DGND					Digital Ground
6	DVdd					Digital supply voltage (5V)
7	CLKIN					Clock input (8,192 MHz)
8	XTALOUT					Crystal output
9	SOE			H		High habilita interfície paral·lela
10	SAMPLE	45	PC13		O	High2Low (low durant 16ns mínim) actualitza les dades
11	DB15	43	PA7		I	
12	DB14	42	PA6		I	
13	DB13	41	PB7		I	
14	DB12	40	PB6		I	
15	DB11	39	PB5		I	
16	DB10	38	PB4		I	
17	DB9	37	PB3		I	
18	Vdrive					Logic power supply input (5V)
20	DB8	34	PA15		I	
21	DB7	33	PA12		IO	
22	DB6	32	PA11		IO	
23	DB5	31	PA10		IO	
24	DB4	30	PA9		IO	
25	DB3	29	PA8		IO	
26	DB2	28	PB15		IO	
27	DB1	27	PB14		IO	
28	DB0	26	PB13		IO	
29	A					Incremental encoder emulator
30	B					Incremental encoder emulator
31	NM					Incremental encoder emulator
32	DIR					Incremental encoder emulator

33	RESET					
34	LOT	25	PB12(cap)		I	Loss of Tracking També connectat a LED Resetejat amb boto
35	DOS	22	PB11		I	Degradation of signal També connectat a LED Resetejat amb boto
36	A1	21	PB10		O	Mode select
37	A0	20	PB2		O	Mode select
38	EXC					
39	EXC NOT					
40	AGND					Analog ground
41	SIN					Positive sinus
42	SINLO					Negative sinus
43	Avdd					Analog supply voltage (5V)
44	COSLO					Negative cosinus
45	COS					Positive cosinus
46	REFBYP					Reference bypass per decoupling capacitors
47	REFOUT					Voltage reference output
48	RES0			LH		Resolució de 16 bits (125 rpm max (8,192MHz))
	EXTRAS					
	Botó clr errors	19	PB1		I	Fa que el micro envii les senyals necessàries per reiniciar els errors
	Reset					
	CAN_TX	46	PB9			
	CAN_RX	45	PB8			
	Power on	3.3V				
	Micro on	18	PB0		O	

Taula 7 Pinout del microcontrolador, ADC i altres connexions

A banda de els pins del STM32F0 utilitzats també s'especifica si es tracta d'un pin d'entrada (I), sortida (O) o els dos alhora (IO), s'especifiquen les funcions i, com ja s'ha dit abans, es mostra a quins pins del ADC es connecta.

Amb aquesta informació ja es pot introduir la configuració al programa amb el que s'obtindrà la següent pantalla (figura 23) en la que es mostra l'esquema del microprocessador i els seus pins utilitzats (en la figura 24 amb més detall) i la interfície del programa.

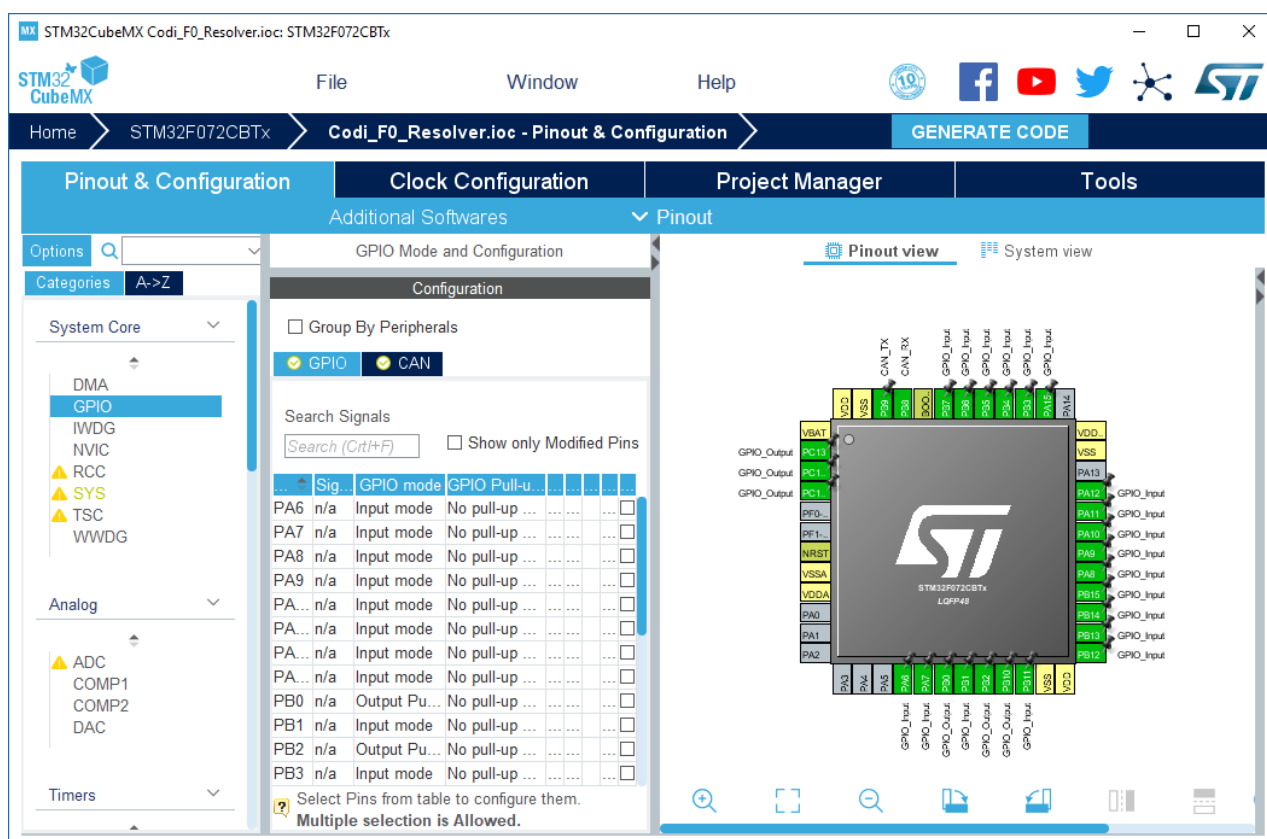


Figura 23 Captura de pantalla del programa CubeMX

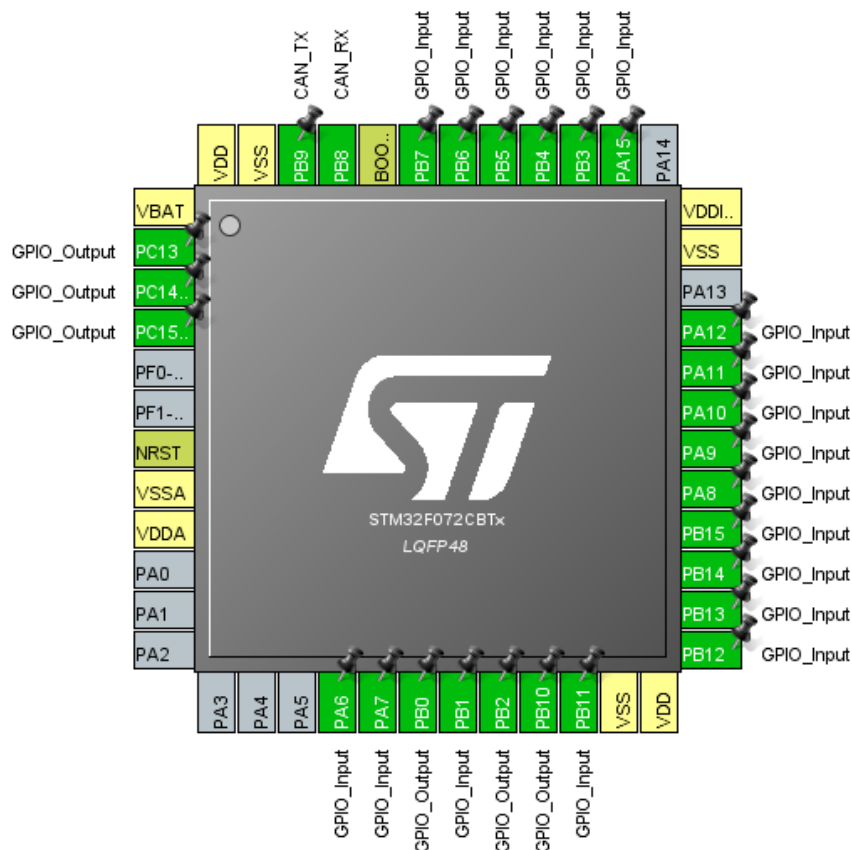


Figura 24 Pinout del microcontrolador mostrat pel programa CubeMX

En la interfície del programa es pot observar un botó que anomenat “GENERATE CODE”, amb aquest botó s’obté el codi complet que linkeja les llibreries i inicialitza les funcions. Aquest codi forma part del codi final que s’adjunta en els annexes.

4.4. Funcions del codi

Aquest codi s'ha organitzat de manera que sigui senzill afegir una configuració nova dels registres, una nova comunicació via CAN, una nova lectura dels valors o qualsevol altra modificació.

Per obtenir això s'ha organitzat el codi amb funcions, de manera que el main únicament fa referència a aquestes tantes vegades com ho necessiti.

Les funcions creades són les següents:

- `void SystemClock_Config(void);`
- `void Config91(void);`
- `void Config92(void);`
- `static void MX_GPIO_Init(void);`
- `static void MX_CAN_Init(void);`
- `void PinConfigWR(char WR);`
- `int PosicioADC(void);`
- `int velocitatADC(void);`
- `void CAN_send(char ID, char Data)`

A continuació es definiran amb detall totes les funcions esmentades.

4.4.1. `void SystemClock_Config(void);`

Aquesta funció és generada per la inicialització del codi generada amb el programa de ST Microelectronics, CubeMX.

Aquesta defineix la freqüència interna del microcontrolador a 48MHz, aquesta és la seva freqüència màxima de funcionament però també és la opció per defecte que ofereix el fabricant. Aquesta freqüència ens permetrà realitzar totes les funcions necessàries sense cap tipus de problema ni delay.

4.4.2. void Config91(void);

Aquesta funció és la que envia les dades a la adreça 0x91, que és la que correspon a la configuració de la freqüència d'excitació.

Primerament configura els pins necessaris com a output.

Després segueix la figura 20 per generar les senyals paral·leles al bus de dades que són necessàries per la configuració del registre com s'ha esmentat abans. Això es fa seguint també la figura 21 que mostra els temps de delay mínims per a que el ADC llegeixi les dades enviades. Aquests temps no es segueixen exactes ja que el processador li és més senzill generar delays de milisegons però el funcionament no es veu afectat ni s'aprecia un delay significatiu a l'hora de utilitzar el producte final.

Les dades assignades són 0x12 que corresponen a 4,5kHz de freqüència d'excitació.

4.4.3. void Config92(void);

Aquesta funció és la que envia les dades a la adreça 0x92, que és la que correspon a la configuració del registre de configuració.

Primerament configura els pins necessaris com a output.

Després segueix la figura 20 per generar les senyals paral·leles al bus de dades que són necessàries per la configuració del registre com s'ha esmentat abans. Això es fa seguint també la figura 21 que mostra els temps de delay mínims per a que el ADC llegeixi les dades enviades. Aquests temps no es segueixen exactes ja que el processador li és més senzill generar delays de milisegons però el funcionament no es veu afectat ni s'aprecia un delay significatiu a l'hora de utilitzar el producte final.

4.4.4. static void MX_GPIO_Init(void);

Aquesta funció d'igual manera que la primera és generada per la inicialització del codi generada amb el programa de ST Microelectronics, CubeMX.

MX_GPIO_Init només es referenciada al començament del codi ja que es tracta de la configuració dels GPIO utilitzats.

El microcontrolador utilitzat consta de tres canals de GPIO (A, B i C), i el codi de la inicialització configura els pins utilitzats de cada un dels tres agrupant-los per Inputs i Outputs i per canal utilitzat.

MX_GPIO_Init ahora inicialitza també els rellotges de cada un dels canal.

4.4.5. static void MX_CAN_Init(void);

Aquesta funció d'igual manera que la primera és generada per la inicialització del codi generada amb el programa de ST Microelectronics, CubeMX.

4.4.6. void PinConfigWR(char WR);

En aquesta funció es redefeixen alguns dels pins configurats en MX_GPIO_Init ja que aquests s'han de utilitzar com a Input o com a Output depenent del moment del programa en el que es troba.

És per això que aquesta funció te com a entrada una lletra que pot ser W (Write) o R (Read), en el primer cas els pins en conflicte es defineixen com a output i en el segon cas com a Input.

Es a dir en les funcions de configuració i de lectura aquesta funció s'utilitzarà per inicialitzar aquells pins abans d'utilitzar-se i al final de les funcions de configuració es tornarà a utilitzar per definir-los com a "Write" per evitar possibles errors dins del codi.

4.4.7. int PosicioADC(void);

En aquesta funció es llegeix del ADC la posició del sensor, es a dir, el angle. Ja que s'utilitza la comunicació paral·lela s'han de fer 16 lectures de bit, aquestes lectures es guarden a un array de 16 posicions que es convertit a int, tractat per convertir-lo a les unitats desitjades i retornat cap al main.

4.4.8. int velocitatADC(void);

En aquesta funció es llegeix del ADC la velocitat del sensor, es a dir, la velocitat angular. Ja que s'utilitza la comunicació paral·lela s'han de fer 16 lectures de bit, aquestes lectures es guarden a un array de 16 posicions que es convertit a int, tractat per convertir-lo a les unitats desitjades i retornat cap al main.

4.4.9. void CAN_send(char ID, char Data)

Aquesta funció es la encarregada de enviar el missatge desitjat a traves del protocol CAN Bus. Es una funció senzilla que utilitza funcions de la llibreria CAN de HAL.

Aquesta funció comença fixant els paràmetres de la futura comunicació tot i que els únics que es modifiquen son el missatge, es a dir les dades i la ID del missatge. Per tant son les dos entrades que rep la funció.

Per altra banda les ID dels missatges serà en el cas de la posició 50, senzillament perquè es pot definir per l'usuari i la lletra P en ASCII convertida a HEX es 50, i per altra banda i amb el mateix criteri la velocitat (V) tindrà l'adreça 56.

5. Test

Tots els apartats previs són totalment teòrics però en aquest apartat s'explicarà la posta en marxa en tots els test i proves que s'han realitzat sobre aquest prototip.

Aquest prototip treballa sobre una bancada del motor MA-55 que conte dins seu el resolver TS2640N441E26 i que es controlat pel inverter realitzat al treball del Josep Biscams referenciat a la introducció d'aquest treball. La següent imatge mostra la bancada on el cable verd és el del resolver, que es connecta a la placa realitzada en aquest treball i el taronja és el de excitació del motor pel inverter.



Figura 25 Imatge de la bancada del motor MA-55 que conté el TS2640N441E26

Degut al temps limitat del desenvolupament d'aquest projecte només es realitzaran tests de funcionament basic, es a dir, que es compleixin els paràmetres amb els que s'ha dissenyat. Si en canvi es donés el cas que fos un producte que es vol dur a producció s'haurien de dur a terme una gran quantitat de test que en aquest projecte no es contemplen.

Els tests comencen soldant la PCB tot seguit es testeja si no es fan continuïtats indesitjades i que es compleixin funcionalitats bàsiques. Primerament es solden els components de l'alimentació i el test mostra que el LED de "Power ON" funciona i els voltatges són els desitjats.

Tot seguit es solda el microcontrolador i s'intenta accedir a la seva memòria amb el programador. En aquest cas es va detectar un problema i es que algunes connexions de GND no es van fer correctament i això es va arreglar

com es veu en la figura 26 amb un petit fil de coure connectat a GND i al pin mal connectat.

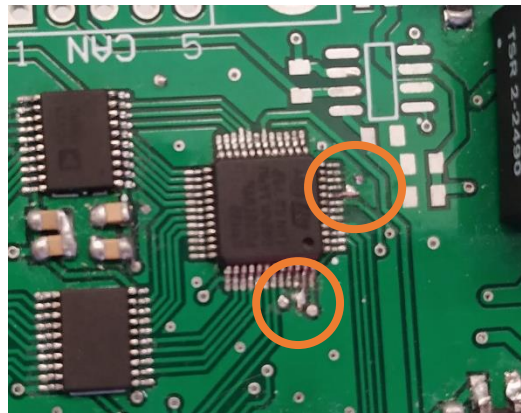


Figura 26 Connexions afegides del microcontrolador a GND

Amb això el microprocessador ja te el connexionat correcte, el següent test consisteix en soldar els buffers i programar el micro per a que activi el LED de "Micro ON" que ens mostrarà que el microcontrolador esta en estat encès i que els buffers funcionen correctament. Com es pot veure en la figura 28 els dos LED d'estat funcionen correctament.

Tot seguit es solda el ADC i amb això la segona fase de soldadura queda completa. Per comprovar el funcionament del ADC es fa una lectura amb el oscil·loscopi de les sortides d'excitació del resolver que mostra un sinus a 10kHz tal com especifica el datasheet i es veu en la figura 27.

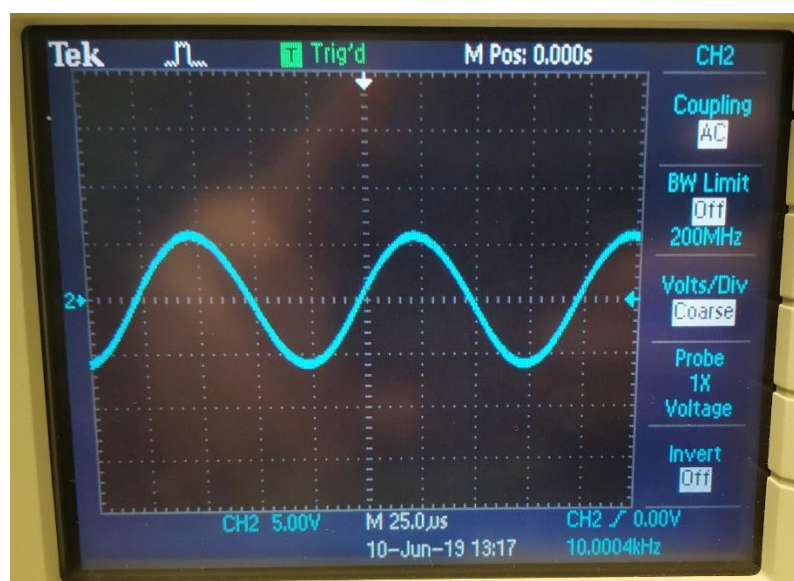


Figura 27 Sinus generat pel ADC a 10kHz

Tot seguit es solden els components del acondicionament de la senyal. En aquest cas es detecta un error de disseny en el que no s'havien situat be alguns dels components en els esquemàtics, tot i que els que es mostren als annexes ja estan corregits. Aquest error es soluciona soldant alguns components de manera diagonal i afegint un retall de cable en el conjunt com es pot veure en la figura 28.

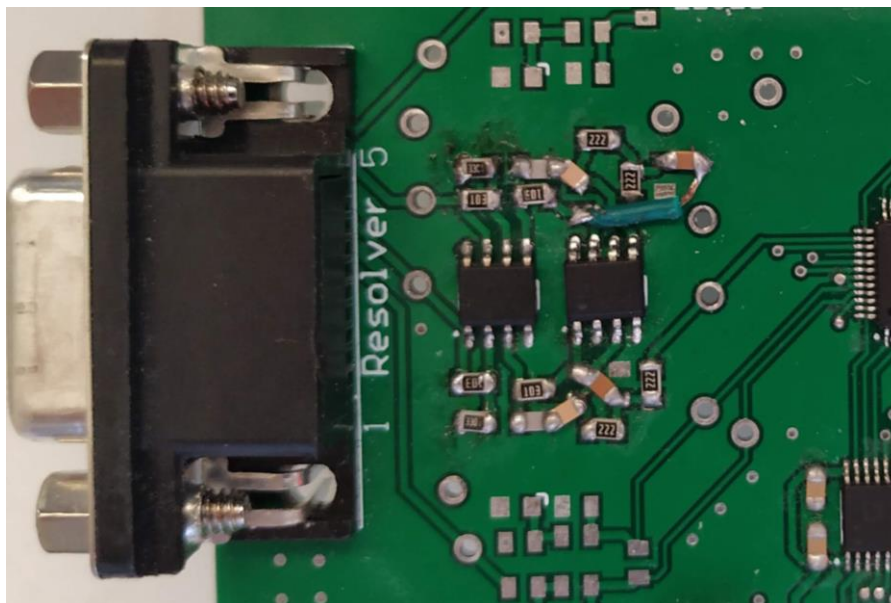


Figura 28 Fase de filtrat amb el problema de schematics solucionat

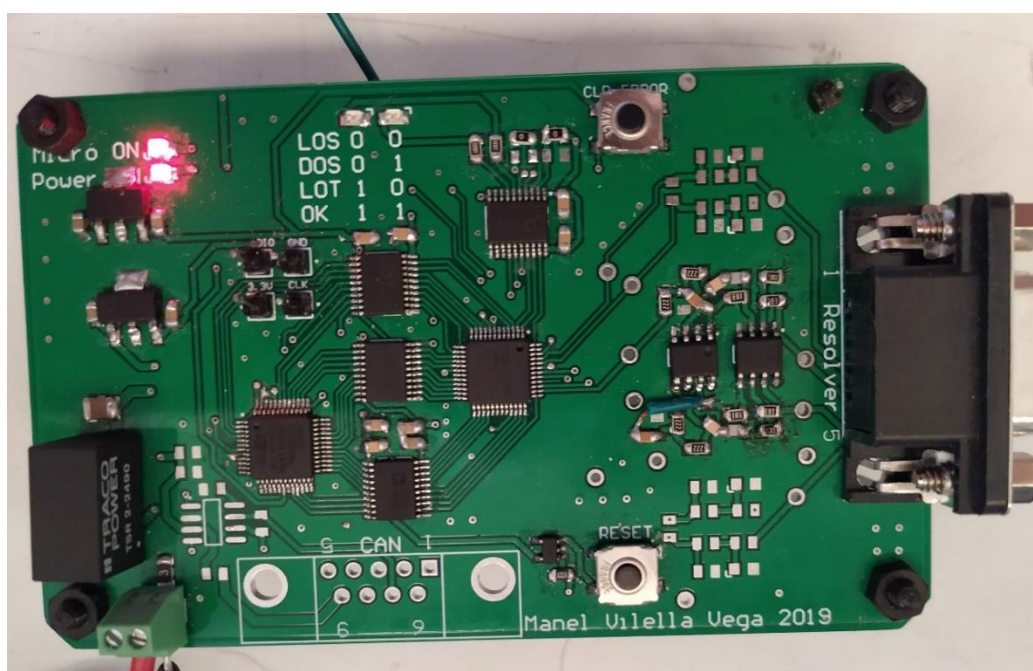


Figura 29 Vista general de la PCB

Per comprovar el correcte funcionament d'aquesta primera etapa d'acondicionament es miren totes les senyals en les diferents fases, però abans es configura el ADC per a que generi la freqüència de ona desitjada i ja se li implementa tot el codi, que es pot trobar en els annexes.

Al implementar el codi es detecta que no es configura el ADC correctament, finalment es modifiquen els temps de delay de la comunicació paral·lela a temps de 100ms i amb aquesta modificació es configura correctament. Més endavant es buscaran valors adequats per aquests delay que no suposin un temps d'arrancada tant alts.

Aquesta senyal s'ha mesurat tant en mode diferencial que genera una ona en corrent alterna ja que una de les dos s'agafa com a referencia i també s'ha mesurat respecte GND que genera una ona en corrent continua. Les següents imatges mostren les diferents fases del acondicionat en els dos modes de mesura.

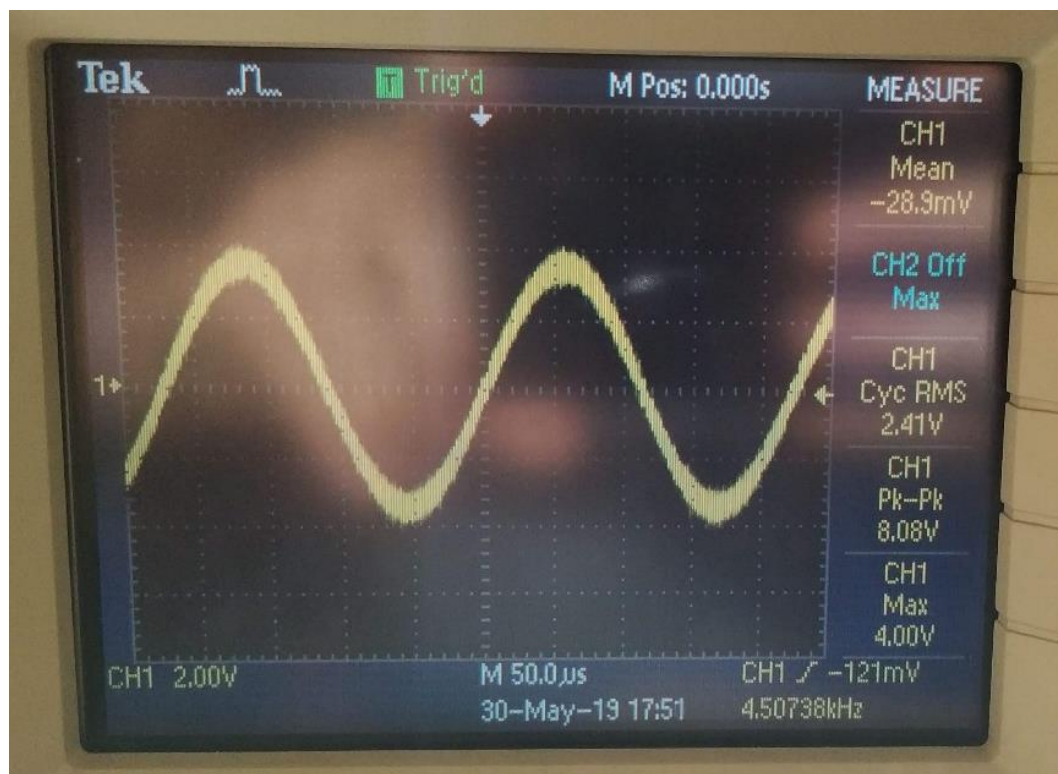


Figura 30 Senyal d'excitació diferencial no filtrada

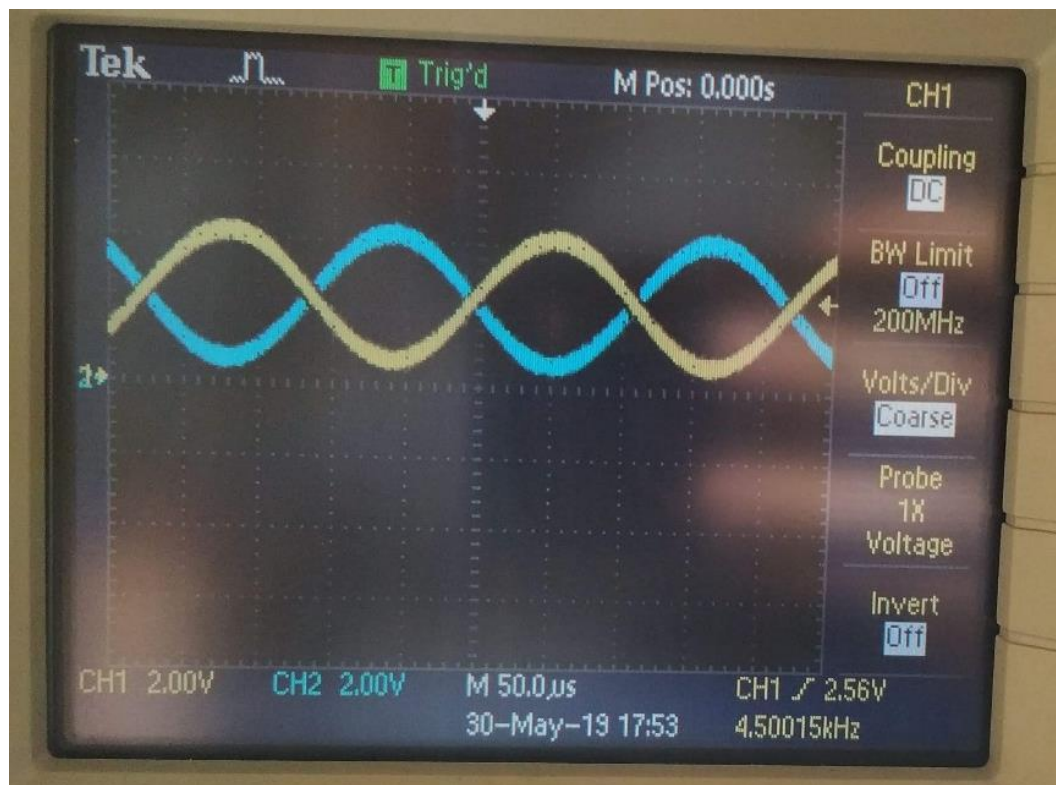


Figura 31

Senyal d'excitació respecte GND no filtrada

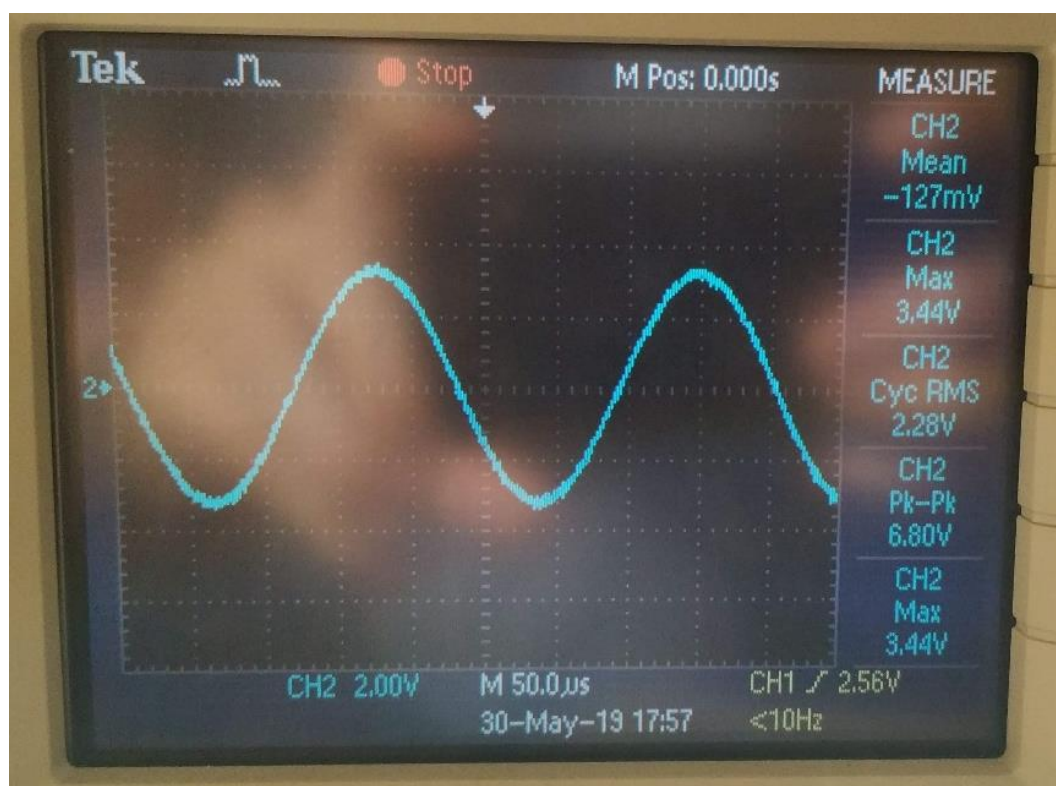


Figura 32

Senyal d'excitació diferencial filtrada

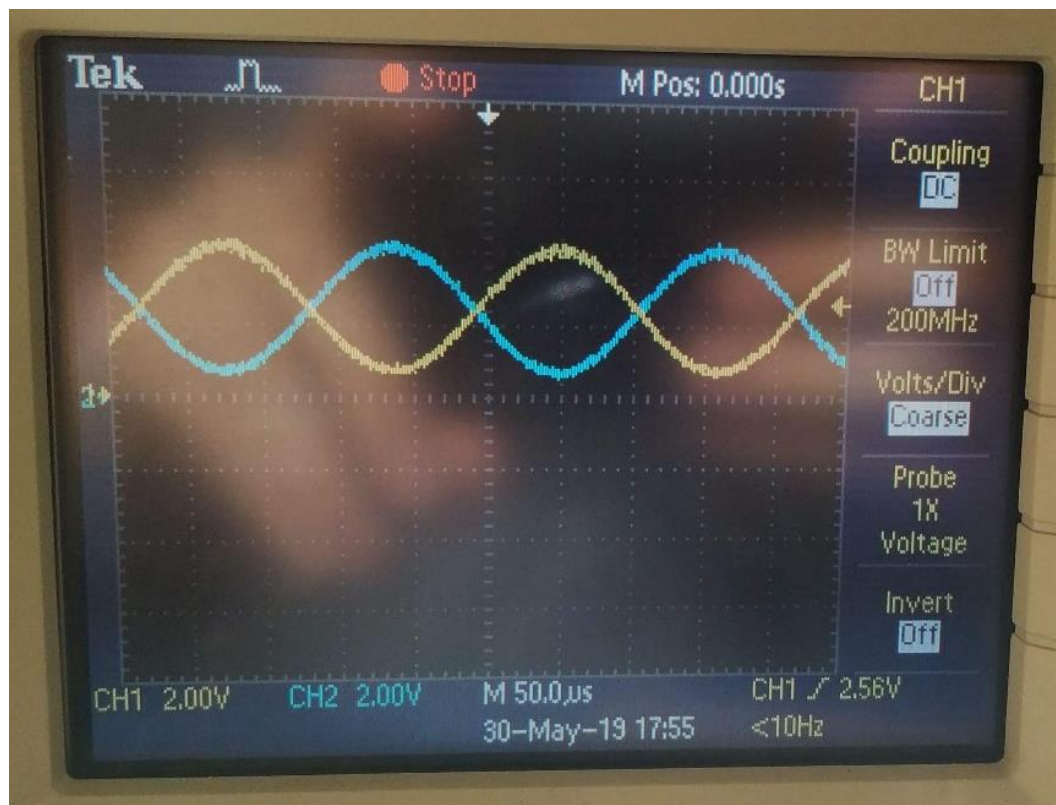


Figura 33 Senyal d'excitació respecte GND filtrada

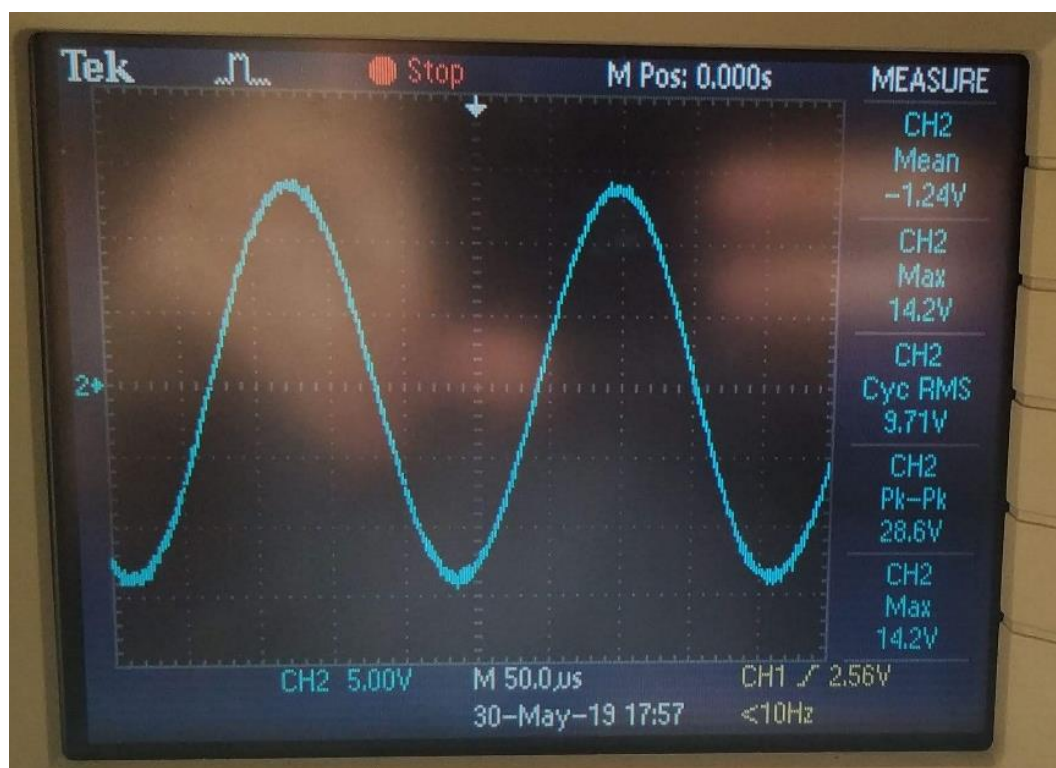


Figura 34 Senyal d'excitació diferencial filtrada i amplificada

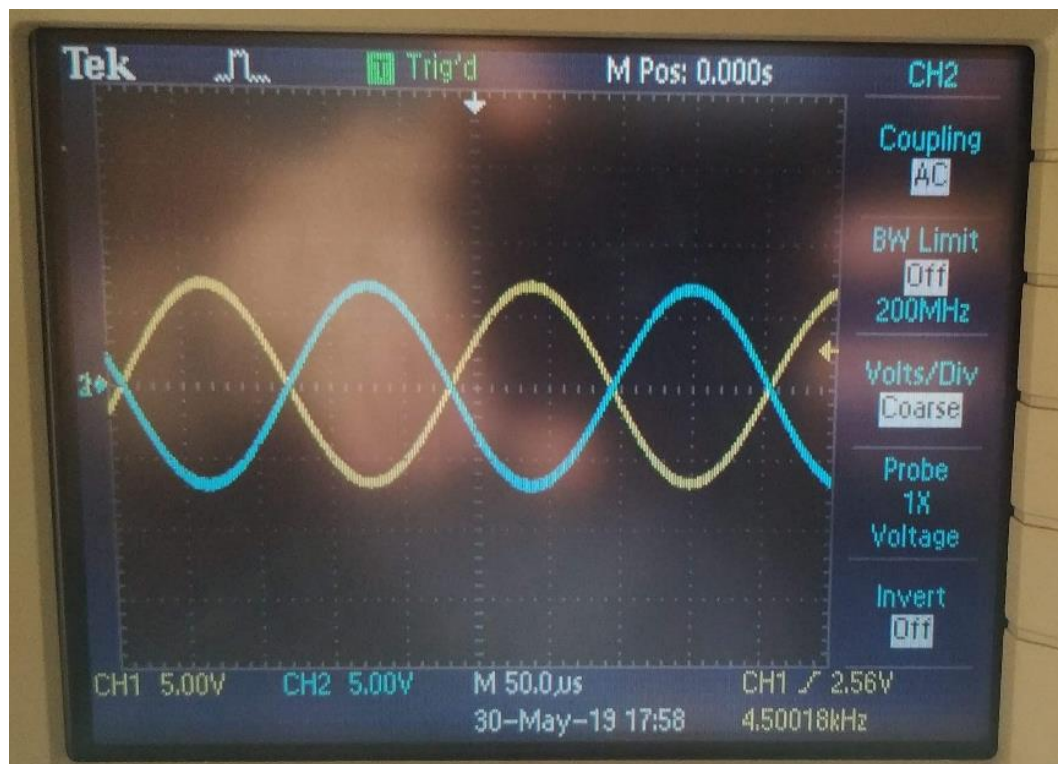


Figura 35 Senyal d'excitació respecte GND filtrada i amplificada

Un cop fets aquests tests en buit, es a dir, sense el sensor connectat es connecta aquest i s'obté el resultat esperat, l'ona manté la forma desitjada i el sensor s'excita correctament. La següent figura mostra la ona d'excitació que rep el sensor.

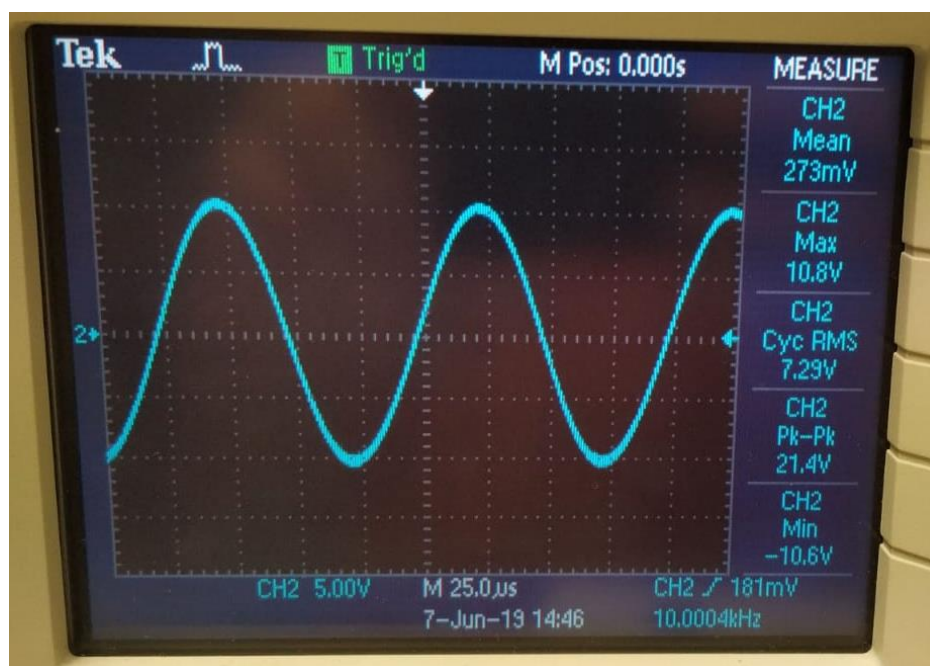


Figura 36 Senyal d'excitació connectada al resolver

Posteriorment es comproven les lectures del sinus i cosinus que genera el sensor i d'igual manera l'ona es correcta i no te excés de soroll. Es gira el motor i s'obtenen diferents figures amb diferents situacions de l'angle, es a dir, diferents configuracions de sinus-cosinus. Les següents figures mostren algunes de les possibles situacions. Entre elles una en la que una de les dos senyals es nul·la i l'altra es màxima.

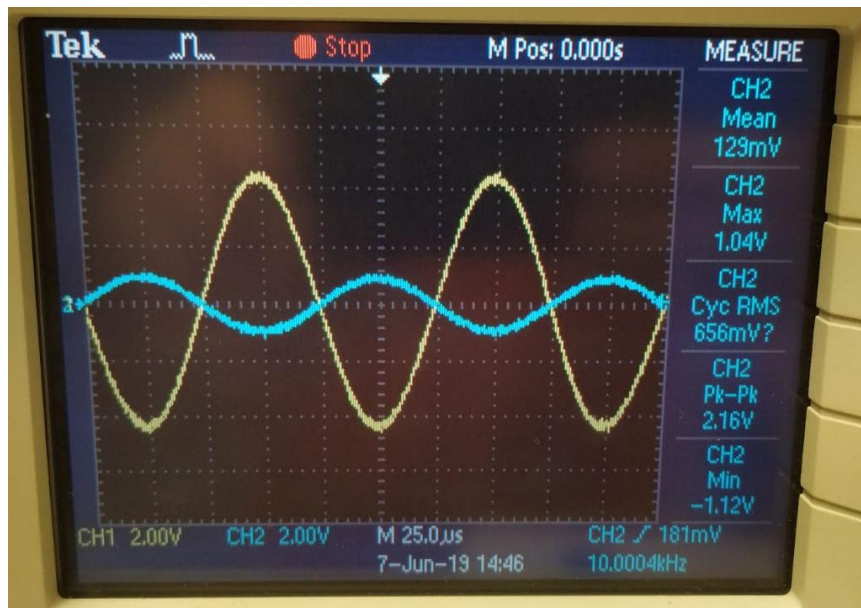


Figura 37 Representació de Sin vs Cos

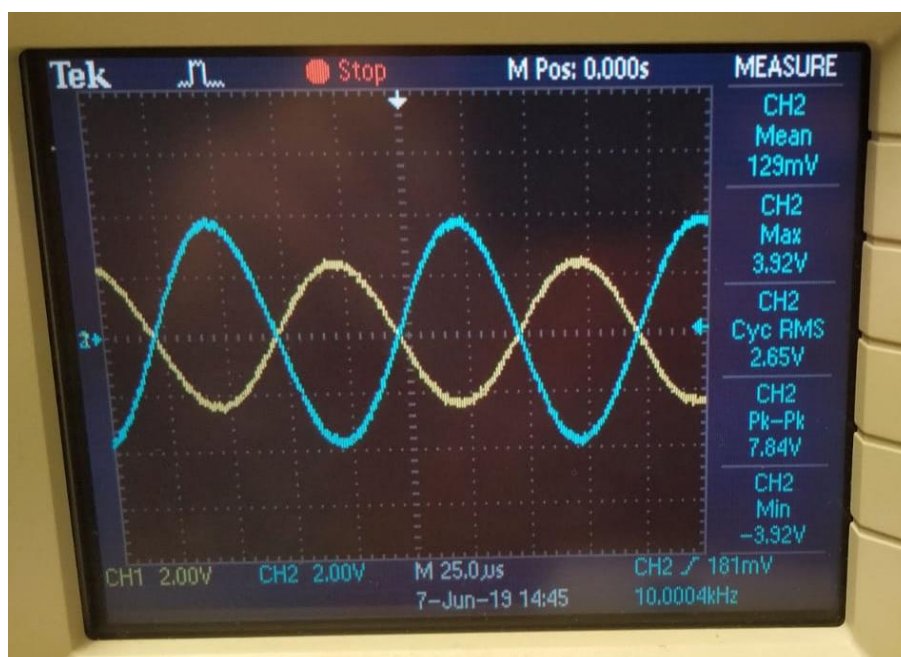


Figura 38 Representació de Sin vs Cos

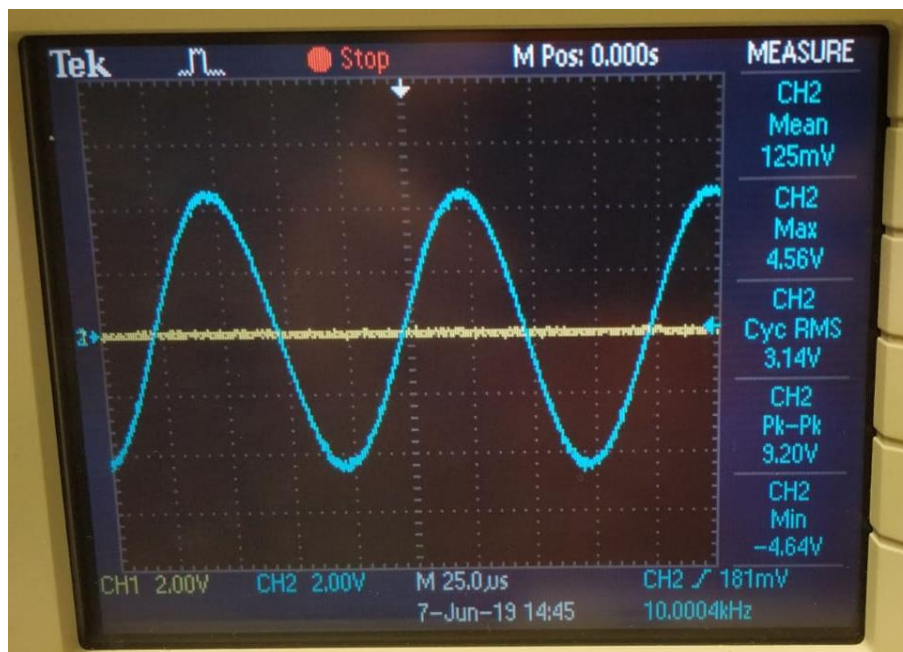


Figura 39 Representació de Sin vs Cos

En aquest últim gràfic es pot veure que el valor màxim de pic a pic es de 9.2V mentre que la màxima que admet el ADC es 4V per tant al filtre diferencial del sinus i cosinus es soldarà una resistència a mode de divisor de 2 KOhms, verificada per simulació.

Finalment es comprova la lectura que realitza el microcontrolador sobre el ADC, això es fa aplicant el codi de lectura tot i que la comunicació amb CAN no s'utilitzarà en aquest cas.

La figura 40 mostra la configuració del connexionat que es disposa en aquest test.

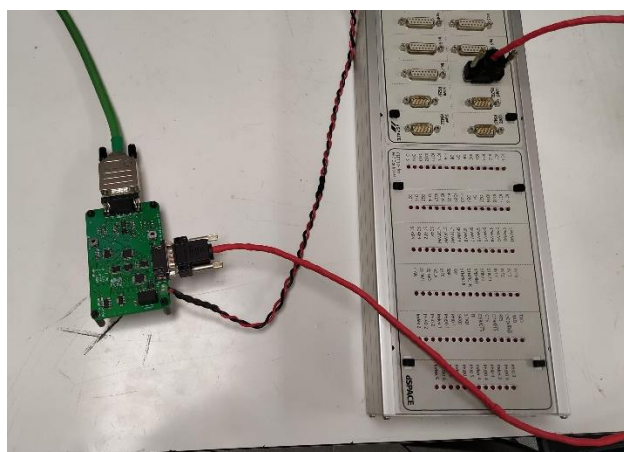


Figura 40 Connexionat de test de lectura

Aquest test s'ha realitzat amb una eina de debugging del microcontrolador que permet veure les variables internes a temps real.

Per tant amb el motor girant es llegeix primerament els bits de la comunicació paral·lela i després es llegeix el valor final de la velocitat o de posició. Aquests valors resulten correctes tot i que falta encara adaptar-los als valors dels angles i velocitat.

La següent figura mostra les variables de els bits llegits de la posició, les variables de pas de la transformació de unitat i finalment el valors de l'angle (posició_int) i de la velocitat (velocitat_int).

Live Watch			
Expression	Value	Location	Type
posicio	<array>	0x20000110	int[16]
[0]	0	0x20000110	int
[1]	0	0x20000114	int
[2]	0	0x20000118	int
[3]	0	0x2000011C	int
[4]	1	0x20000120	int
[5]	1	0x20000124	int
[6]	1	0x20000128	int
[7]	1	0x2000012C	int
[8]	1	0x20000130	int
[9]	1	0x20000134	int
[10]	1	0x20000138	int
[11]	1	0x2000013C	int
[12]	1	0x20000140	int
[13]	1	0x20000144	int
[14]	1	0x20000148	int
[15]	1	0x2000014C	int
P	<array>	0x20000150	int[16]
[0]	0	0x20000150	int
[1]	0	0x20000154	int
[2]	0	0x20000158	int
[3]	0	0x2000015C	int
[4]	16	0x20000160	int
[5]	32	0x20000164	int
[6]	64	0x20000168	int
[7]	128	0x2000016C	int
[8]	256	0x20000170	int
[9]	512	0x20000174	int
[10]	1204	0x20000178	int
[11]	2048	0x2000017C	int
[12]	4096	0x20000180	int
[13]	8192	0x20000184	int
[14]	16384	0x20000188	int
[15]	32768	0x2000018C	int
posicio_int	65700	0x2000004C	int
velocitat_int	55	0x20000048	int
<click to ad...			

Figura 41

Variables del programa en temps real

6. Pressupost

En aquest apartat es presentarà el resultat del pressupost d'aquest projecte i se'n desglossaran els costos.

Cal destacar que aquest projecte s'ha enfocat com a un projecte unitari enfocat en el prototipat d'un control i que no és apte per a ser industrialitzat. Això fa que només es tinguin en compte els costos referits al material necessari per a la construcció dels prototips i les hores de mà d'obra d'enginyeria.

Concepte	Cost	%
Preu fabricació PCB	22.41 €	0.36
Components fabricació dos prototips	265.68 €	4.23
Recursos humans	6000 €	95.42

Taula 8 Costos del projecte

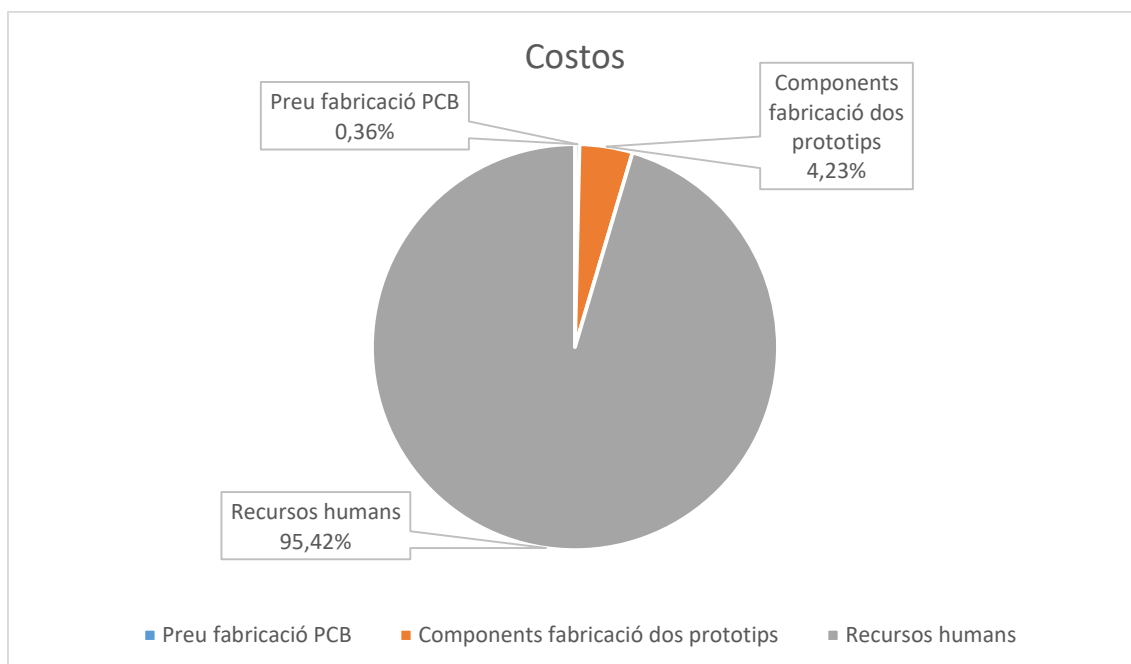


Figura 42 Representació dels costos del projecte

El preu final del projecte és de 6288,09 € dels quals la major part són els recursos humans invertits en el projecte, que consisteixen en les 600 hores dedicades al projecte pagades a un preu de 10 € l'hora.

La següent taula mostra una distribució aproximada de aquestes 600 hores de treball alhora que les dependències que limiten els treballs en paral·lel que es poden realitzar.

Lletra	Tasca	Temps (Hores)	Dependències
A	Inici	0	-
B	Índex	5	A
C	Definició de l'objectiu del projecte	1	A
D	Definició de l'abast del projecte	1	A
E	Definició de les especificacions bàsiques	1	D
F	Objecte del projecte	1	D
G	Justificació del projecte	1	C
H	Entrega del Project Charter	7	C,D,E,F,G
I	Estudi control FOC	20	H
J	Estudi funcionament Resolver	10	H
K	Estudi comunicacions	10	H
L	Redacció estudis previs	20	I,J,K
M	1r seguiment	0	I,J,K
N	Esquema general	10	M
O	Disseny filtres	20	N
P	Tria de components	15	N,O
Q	Disseny esquemàtics	60	P
R	Disseny PCB	60	Q
S	Generació gerber	2	R
T	Redacció disseny	50	S
U	2n seguiment	0	T
V	BOM	10	Q
W	Anàlisis datasheet resolver i ADC	15	N
X	Esquema programació	10	W
Y	Programació	70	X
Z	Soldatge PCB	30	S
AA	Test PCB & troubleshooting	70	Z
AB	3r seguiment	0	AA
AC	Test sistema motor	20	AB
AD	Redacció test	30	AA,AC
AE	Cost del projecte	10	V,Q,R
AF	Conclusions	3	AD
AG	Bibliografia	7	-
AH	Documents annexos	10	-
AI	Redacció final	20	AF,AG,AH,AD,T,L
AJ	Powerpoint de la presentació	10	AI
AK	Presentació TFG	0	AJ
AL	Final	0	AK

Taula 9 Distribució de les hores de treball i dependències

Els preus dels components es poden veure desglossats en el annex que conté el BOM on es pot veure els components comprats amb el seu numero de referencia, el preu individual, les quantitats adquirides i els preus finals.

7. Conclusions

A la finalització del projecte s'ha arribat a les següents conclusions:

- Els resolvers són una bona solució a l'hora de controlar motors ja que aporten una resolució i velocitat molt alta tot i que requereixen més electrònica que altres sensors i això fa que el seu preu en el conjunt pugui ser major a altres opcions.
- A l'hora de dissenyar una PCB els estudis previs sobre les funcions que s'hi implementaran són molt importants i aportaran una robustesa al producte final.
- La tria de components és crítica, ja que un component que no compleix els requeriments pot fer que tot el sistema falli o que a la llarga doni problemes, i que aquest problema sigui difícil de detectar ja que no és evident.
- En la programació de microcontroladors, és més laboriós la configuració de les llibreries a utilitzar i les funcions a les que es fa referència, que la implementació de les mateixes.

Com a conclusió general del projecte, es pot dir que s'ha validat el controlador del resolver i que hauria de complir amb les especificacions bàsiques que se li han assignat, tot i que degut al limitat temps de la part experimental no s'han pogut testear bé totes.

8. Bibliografia

- [1] Electronics Hub, [En línia]. Available:
<https://www.electronicshub.org/basics-serial-peripheral-interface-spi/>.
- [2] L. Llamas. [En línia]. Available: <https://www.luisllamas.es/arduino-i2c/>.
- [3] M. Morales, teslabem, [En línia]. Available: <https://teslabem.com/nivel-intermedio/fundamentos-del-protocolo-i2c-aprende/>.
- [4] B. Parikh, Engineers Garage, [En línia]. Available:
<https://www.engineersgarage.com/article/what-is-controller-area-network>.
- [5] D. L. V.I. Rudnev, «sciencedirect,» [En línia]. Available:
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/voltage-source-inverter>.
- [6] S. O. J. G. i. C. N. D. L. R. Jakub Szymczak, Analog devices, [En línia]. Available: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/precision-rtdc-measures-angular-position-and-velocity.html>.
- [7] S. B. Fernandez, «SENSORES PARA MEDIR DESPLAZAMIENTO».
- [8] Data Device Corporation, SYNCHRO/RESOLVER CONVERSION HANDBOOK, 2009.
- [9] Wikipedia, [En línia]. Available:
[https://en.wikipedia.org/wiki/Resolver_\(electrical\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Resolver_(electrical)).
- [10] Freescale Semiconductor, Inc., «Sensorless PMSM Field-Oriented Control,» 2016.
- [11] D. A. Arias, «PMSM Control (FOC & DTC) for WECS & Drives».
- [12] Analog Devices, «Decoupling Techniques MT-101 TUTORIAL,» 2009.

- [13] J. B. i. M. B. Walt Kester, «Grounding Data Converters and Solving the Mystery of "AGND" and "DGND",» 2008.
- [14] M. Chen, «Understanding and Designing Differential Filters for Communications Systems».
- [15] S. O. J. G. i. C. N. D. L. R. Jakub Szymczak, «AnalogDialogue,» [En línia]. Available: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/precision-rtdc-measures-angular-position-and-velocity.html>.
- [16] Microchip, [En línia]. Available: <https://www.microchip.com/design-centers/motor-control-and-drive/motor-types/permanent-magnet-synchronous-motor>.
- [17] Mouser, [En línia]. Available: <https://www.mouser.es/ProductDetail/NXP-Freescale/MKV10Z128VLF7?qs=sGAEpiMZZMuokKEcg8mMKKywyJ6nXWno8sqjeolJY4j3rYPSBBk1yw==>.
- [18] Mouser, [En línia]. Available: <https://www.mouser.es/ProductDetail/Texas-Instruments/F280049PMS?qs=sGAEpiMZZMsrb0xF%2FYczN2eMubjpkGpWMUYz%252BAJbRzIANfCHyTWEWQ%3D%3D>.
- [19] Mouser, [En línia]. Available: <https://www.mouser.es/ProductDetail/Microchip-Technology/PIC24EP512GU810-I-PF?qs=sGAEpiMZZMsp%252Bcahb6g%252BW05Raz8epP0eE2g1k%252Bz3P%2F0%3D>.
- [20] Mouser, [En línia]. Available: <https://www.mouser.es/ProductDetail/Microchip-Technology/ATSAME51J20A-AFT?qs=sGAEpiMZZMsrb0xF%2FYczN2eMubjpkGpWqhYg9IIX8suXITx8bwCbqA%3D%3D>.

- [21] Mouser, [En línia]. Available:
<https://www.mouser.es/ProductDetail/STMicroelectronics/STM32F072CBT6?qs=sGAEpiMZZMuokKEcg8mMKHj6W%2F7bc8cz7aa49C3C0HzuiJ9VHwZ%2FIA%3D%3D>.
- [22] Mouser, [En línia]. Available:
<https://www.mouser.es/ProductDetail/STMicroelectronics/STM32F405RGT6?qs=sGAEpiMZZMuokKEcg8mMKD%2FuJqcAEcv58nqEPNzkg0g%3D>.
- [23] M. C. i. A. O. Leszek Jarzebowicz, «Angle Tracking Observer for Filtering Rotor Position Estimates in Sensorless Electric Drives,» ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA, 2016.
- [24] Analog Devices, «Evaluating the AD2S1210 10-Bit to16-Bit Resolver-to-Digital Converter».
- [25] Tamagawa, «TS2640N441E26 Datasheet».
- [26] Analog Devices, «ADG3308/ADG3308-1 Datasheet».
- [27] Analog Devices, «AD2S1210 Datasheet,» 2016.
- [28] Analog devices, «ADM823/ADM824/ADM825 Datasheet».
- [29] Microchip, «MCP2551 Datasheet».
- [30] STMicroelectronics, «STM32F072x8 STM32F072xB Datasheet».
- [31] STMicroelectronics, «LD3985 SERIES Datasheet».
- [32] Texas Instruments, «TLE202x, TLE202xA, TLE202xB, TLE202xY Datasheet».
- [33] Tamagawa, «Smartcoder AU6805 USERS MANUAL».
- [34] Texas Instruments, «OPA2172IDR Datasheet».